

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef
Faculté de Génie Civil et d'Architecture

Département de Génie Civil



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Voies et Ouvrages d'Art

Par

AMARA Rezki

Thème :

ANALYSE ET PREDICTION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES ELEMENTS D'UN OUVRAGE D'ART RENFORCES PAR MATERIAUX INNOVANTS

Soutenue le 30/11/2024 devant le jury composé de :

BOULEKBACHE Bensaid	Professeur	Université de Chlef	Président
HOUARI Mohamed Sid Ahmed	Professeur	Université de Mascara	Examineur
BESSAIM Aicha	Professeur	Université d'Oran	Examinatrice
BERRADIA Mohammed	MCA	Université de Chlef	Examineur
AIT ATMANE Hassen	Professeur	Université de Chlef	Rapporteur
NEBAB Mokhtar	MCB	Université de Boumerdes	Co- Rapporteur

Dédicace

To my mother, you are my beautiful world,

To my father.

All the respect and love for both of you ♥.

Remerciements

Tout d'abord, j'adresse mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, Professeur **AIT ATMANE Hassen**, pour son soutien qu'il n'a cessé de m'apporter, sa disponibilité et ses précieux conseils qui ont permis de mener à bien ce travail. Ses qualités humaines et ses nombreuses connaissances et plus largement scientifiques m'ont permis de progresser et de prendre confiance.

Je remercie également **NEBAB Mokhtar**, Maître de conférences à l'Université M'hamed Bougara de Boumerdes, co-directeur de la thèse de m'avoir aidé, sa collaboration est également efficace tout au long de ce travail.

Je remercie également **BENNAI Riadh**, Professeur à l'université de Chlef, de m'avoir aidé et pour sa disponibilité.

M. **BOULEKBACHE Bensaid**, Professeur à l'Université de Chlef, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du Jury.

M. **HOUARI Mohamed Sid Ahmed**, Professeur à l'université Mascara, qui a accepté d'examiner cette thèse et de faire partie du jury.

M^{me}. **BESSAIM Aicha**, Professeur à l'université Mascara, qui a accepté d'examiner cette thèse et de faire partie du jury.

M. **BERRADIA Mohammed**, Maître de Conférences à l'Université de Chlef, qui a accepté d'examiner cette thèse et de faire partie du jury.

Je tiens également à remercier M. **Ahmed DJAFAR HENNI**, Professeur retraité de l'Université de Hassiba Benbouali de Chlef et président du Comité de la Formation Doctorale (CFD) pour son soutien et pour avoir assuré notre formation doctorale.

Je remercie tous les enseignants et mes collègues qui ont contribué directement ou indirectement à ma formation de 3^{ème} cycle, qui m'ont soutenu et aidé du premier jour de ma classe primaire jusqu'à ce jour.

Résumé

La réhabilitation des structures en béton armé représente un défi majeur pour garantir la durabilité et la sécurité des infrastructures. L'utilisation de polymères renforcés de fibres (FRP) comme renfort s'est largement répandue, mais l'efficacité de cette technique dépend crucialement du comportement de l'interface FRP-Poutre. Les concentrations de contraintes à cette interface, notamment aux extrémités des plaques, peuvent provoquer un délaminage prématuré et compromettre l'intégrité structurelle. Ce travail de recherche s'est focalisé sur l'application des matériaux composites bio-inspirés et des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour prédire et améliorer la répartition des contraintes interfaciales dans les poutres en béton armé renforcées. Inspirés de structures naturelles comme les coquilles de mollusques, les matériaux bio-inspirés présentent des avantages significatifs en termes de gestion des contraintes et de durabilité.

L'étude a combiné des modèles analytiques et des techniques d'apprentissage automatique pour simuler les effets hygro-thermo-mécaniques sur les poutres renforcées. Les résultats montrent que l'intégration de plaques composites bio-inspirées, notamment dans des configurations hélicoïdales, permet de réduire efficacement les concentrations de contraintes interfaciales, améliorant ainsi la longévité et la sécurité des structures renforcées. Le modèle a été validé par une modélisation utilisant la méthode des éléments finis via le logiciel Abaqus, permettant une évaluation précise de la répartition des contraintes et des déformations. Parallèlement, l'utilisation des réseaux de neurones artificiels a permis d'affiner la prédiction des contraintes, en tenant compte de multiples variables comme l'épaisseur des plaques, l'orientation des fibres, et les conditions environnementales. L'analyse paramétrique a révélé que l'augmentation du nombre de couches et la rigidité accrue des matériaux de renforcement contribuent à la réduction des contraintes au niveau de l'interface.

Les résultats ont démontré l'apport significatif des matériaux composites bio-inspirés pour réduire les contraintes à l'interface, combinés aux réseaux de neurones artificiels, dans la prédiction des contraintes interfaciales et le renforcement des structures.

Mots-clés : Renforcement, Matériaux bio-inspirés, Réseaux de neurones artificiels, Contraintes interfaciales, Effets hygro-thermo-mécaniques, Poutres en béton armé.

Summary

The rehabilitation of reinforced concrete structures represents a major challenge to ensure the durability and safety of infrastructures. The use of fiber-reinforced polymers (FRP) as reinforcement has become widespread, but the effectiveness of this technique crucially depends on the behavior of the FRP-Beam interface. Stress concentrations at this interface, particularly at the plate ends, can lead to premature delamination and compromise the structural integrity. This research focused on the application of bio-inspired composite materials and artificial neural networks (ANNs) to predict and improve the distribution of interfacial stresses in reinforced concrete beams. Inspired by natural structures such as mollusk shells, bio-inspired materials offer significant advantages in terms of stress management and durability.

The study combined analytical models and machine learning techniques to simulate hygro-thermo-mechanical effects on reinforced beams. The results show that the integration of bio-inspired composite plates, particularly in helicoidal configurations, effectively reduces interfacial stress concentrations, thereby enhancing the longevity and safety of reinforced structures. The model was validated by finite element modelling via Abaqus software, enabling accurate assessment of stress and strain distribution. Additionally, the use of artificial neural networks helped refine stress prediction by accounting for multiple variables such as plate thickness, fiber orientation, and environmental conditions. Parametric analysis revealed that increasing the number of layers and the stiffness of the reinforcement materials contributes to reducing stresses at the interface.

The results demonstrated the significant contribution of bio-inspired composite materials for reducing interface stresses, combined with artificial neural networks, in predicting interfacial stresses and reinforcing structures.

Keywords: Reinforcement, Bio-inspired materials, Artificial neural networks, Interfacial stresses, Hygro-thermo-mechanical effects, Reinforced concrete beams.

ملخص

إعادة تأهيل الهياكل الخرسانية المسلحة يمثل تحديًا كبيرًا لضمان استدامة وأمان البنية التحتية. لقد انتشر استخدام البوليمرات المسلحة بالألياف (FRP) كتعزيز بشكل واسع، لكن فعالية هذه التقنية تعتمد بشكل أساسي على سلوك واجهة FRP-العارضة. تركيز الإجهادات عند هذه الواجهة، خصوصًا عند نهايات الصفائح، يمكن أن يسبب انفصالًا مبكرًا ويؤدي إلى تقويض السلامة الهيكلية. ركز هذا البحث على تطبيق المواد المركبة المستوحاة من الطبيعة والشبكات العصبية الاصطناعية (RNA) للتنبؤ وتحسين توزيع الإجهادات البينية في العوارض الخرسانية المسلحة المعززة. المواد المستوحاة من الطبيعة، مثل تلك المستلهمة من هياكل الأصداف البحرية، تقدم مزايا كبيرة في إدارة الإجهادات والمتانة.

جمعت الدراسة بين النماذج التحليلية وتقنيات التعلم الآلي لمحاكاة التأثيرات الميكانيكية والحرارية والرطوبة على العوارض المعززة. وأظهرت النتائج أن دمج الصفائح المركبة المستوحاة من الطبيعة، خاصة في التكوينات الحلزونية، يقلل بشكل فعال من تركيز الإجهادات البينية، مما يحسن من عمر وأمان الهياكل المعززة. وقد تم التحقق من صحة النموذج من خلال نمذجة العناصر المحدودة عبر برنامج Abaqus، مما يتيح إجراء تقييم دقيق لتوزيع الضغوط والإجهادات. بالتوازي، سمحت استخدامات الشبكات العصبية الاصطناعية بتحسين دقة التنبؤ بالإجهادات، مع مراعاة العديد من المتغيرات مثل سمك الصفائح، اتجاه الألياف، والظروف البيئية. وكشفت التحليلات البارامترية أن زيادة عدد الطبقات وزيادة صلابة مواد التعزيز تساهم في تقليل الإجهادات عند الواجهة.

أظهرت النتائج المساهمة الكبيرة للمواد المركبة المستوحاة من المواد الحيوية في تقليل الضغوط عند السطح البيني، جنبًا إلى جنب مع الشبكات العصبية الاصطناعية، في التنبؤ بالضغوط البينية وهياكل التسليح.

الكلمات المفتاحية: تعزيز، مواد مستوحاة من الطبيعة، شبكات عصبية اصطناعية، إجهادات بينية، تأثيرات حرارية-رطوبة-ميكانيكية، عوارض خرسانية مسلحة.

Sommaire

Dédicace.....	II
Remerciements.....	III
Résumé.....	IV
Summary.....	V
ملخص.....	VI
Sommaire.....	VII
Liste des Figures.....	X
Liste des Tableaux.....	XII
Liste des notations.....	XIII
Introduction Générale.....	2
CHAPITRE I : Pathologies, mecanismes de degradation des structures et techniques de rehabilitation et de renforcement	
I.1. Introduction.....	7
I.2. Types courants de dégradation dans les ouvrages en béton.....	8
I.2.1. Pathologies d'origine physique.....	8
I.2.2. Pathologies d'origine mécanique.....	11
I.2.3. Pathologies d'origine chimique.....	14
I.2.4. Autres mécanismes de dégradation.....	17
I.3. Impact de la dégradation sur les performances mécaniques des ouvrages.....	18
I.4. Importance de techniques de réhabilitation et de renforcement efficaces.....	19
I.5. Techniques traditionnelles de renforcement des ouvrages en béton.....	20
I.5.1. Chemisage en acier et revêtements en béton.....	20
I.5.2. Précontrainte externe et post-tension.....	22
I.5.3. Renforcement avec plaques en acier.....	23
I.5.4. Renforcement par béton projeté.....	24
I.5.5. Traitement des fissures et des zones endommagées.....	24
I.6. Techniques de renforcement innovantes avec des composites FRP.....	25
I.6.1. Avantages des composites FRP par rapport aux méthodes traditionnelles.....	26
I.6.2. Différents systèmes et applications de renforcement FRP.....	27
I.6.3. Défis et considérations pour l'application des FRP.....	29
I.7. Importance des contraintes interfaciales dans les structures renforcées par FRP.....	30
I.8. Matériaux composites.....	31
I.8.1. Introduction aux matériaux composites.....	31
I.8.2. Types de renforts composites.....	32
I.8.3. Les matrices dans les composites.....	35
I.8.4. Architecture des matériaux composites.....	35
I.8.5. Propriétés mécaniques des composites.....	37
I.9. Applications des matériaux composites en génie civil.....	38

I.10. Conclusion	39
CHAPITRE II : Méthode des réseaux de neurones artificiels et son intégration dans le domaine de l'ingénierie	
II.1. Introduction	42
II.2. Historique et définition de la méthode des réseaux de neurones artificiels	43
II.2.1. Définition	44
II.2.2. Modèles de réseaux de neurones.....	45
II.3. Principes fondamentaux des réseaux de neurones artificiels	46
II.3.1. Inspiration biologique et modèle du neurone.....	46
II.3.2. Structure et fonctionnement du neurone artificiel	47
II.3.3. Architecture des réseaux de neurones.....	49
II.4. Apprentissage et Optimisation dans les RNAs	51
II.4.1. Types et processus d'apprentissage.....	51
II.4.2. Algorithmes d'apprentissage et optimisation	52
II.4.3. Processus d'apprentissage	53
II.4.4. Prétraitement des données et normalisation.....	54
II.5. Evaluation des performances et validation des modèles.....	54
II.5.1. Métriques d'évaluation des erreurs (MSE, RMSE, MAPE).....	55
II.5.2. Coefficient de corrélation de Pearson (R).....	55
II.5.3. Techniques de validation des modèles.....	56
II.6. Avantages et Limitations de RNA	56
II.6.1. Avantages des RNAs	57
II.6.2. Limitations des RNAs.....	57
II.7. Applications des RNAs en technologie	58
II.7.1. Robotique et systèmes autonomes	58
II.7.2. Technologies de l'information et des communications	59
II.7.3. Santé et biotechnologie	59
II.7.4. Finance et Economie.....	60
II.7.5. Éducation	60
II.7.6. Agriculture et Environnement.....	61
II.7.7. Énergie	61
II.8. Applications des RNAs dans le Génie Civil	62
II.8.1. Aperçu des applications des RNAs dans le génie civil.....	62
II.8.2. Intégration des RNAs avec d'autres technologies pour l'ingénierie civile.....	62
II.8.3. Perspectives d'avenir pour les RNAs dans les structures d'ingénierie	63
II.9. Conclusion	63
CHAPITRE III : Étude analytique du comportement d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par plaque composite de type bio-inspire sous l'effet hygro-thermo-mecanique	
III.1. Introduction.....	66
III.2. Revue sur les matériaux bio-inspirés	67

III.3.	Modèle analytique pour une poutre renforcée par matériaux bio-inspirés	69
III.3.1.	Hypothèses de base	69
III.3.2.	Plaques de renforcement en matériau bio-inspiré	70
III.3.3.	Poutres en béton endommagées	73
III.3.4.	Équations d'équilibre élastique	73
III.3.5.	Distribution des contraintes de cisaillement au long de l'interface FRP-Poutre : ..	74
III.3.6.	Distribution de la contrainte normale au long de l'interface FRP-Poutre :	76
III.4.	Modèle Analytique Pour Une Poutre Renforcée par Monocouche	78
III.4.1.	Distribution des contraintes de cisaillement au long de l'interface FRP-Poutre...	78
III.4.2.	Distribution de la contrainte normale au long de l'interface FRP-Poutre :	79
III.5.	Résultats et discussions	80
III.5.1.	Études comparatives (Validation)	80
III.5.2.	Etude paramétrique	82
III.6.	Conclusions	101
CHAPITRE IV : Étude prédictive du comportement d'interface d'une poutre en béton arme renforcée par une plaque composite de type bio-inspire sous l'effet hygro- thermo-mécanique		
IV.1.	Introduction	104
IV.2.	L'approche d'apprentissage automatique	104
IV.2.1.	Approche de l'apprentissage automatique du model de renforcement par composites bio inspirés	105
IV.2.2.	Approche de l'apprentissage automatique du model de renforcement par composites monocouche	111
IV.3.	Validations des résultats des modèles RNA's	115
IV.3.1.	Validation des résultats du model RNA pour le cas d'un renfort monocouche..	115
IV.3.2.	Validation des résultats du model RNA pour le cas d'un renfort en bio inspiré	117
IV.3.3.	Etude Numérique	119
IV.4.	Étude paramétrique	124
IV.4.1.	Effet du nombre de couches de stratifié.....	128
IV.4.2.	Effet de l'orientation des fibres	129
IV.4.3.	Effet de la nature du chargement appliqué	131
IV.4.4.	Impact de la porosité à différentes phases de chargement.....	132
IV.4.5.	Effet de la longueur de la poutre en BA	134
IV.4.6.	Effet du module d'Young de la plaque.....	135
IV.4.7.	Effet du module d'Young de la poutre	137
IV.4.8.	Effet des propriétés de l'adhésif	138
IV.5.	Conclusion	140
Conclusion générale		142
Références Bibliographiques		145

Liste des Figures

Figure I.1:	Illustration d'un béton faïencé dans un tunnel suite à un incendie	9
Figure I.2:	Représentation schématique du retrait autogène de la pâte de ciment durcissant	11
Figure I.3:	Ruptures par cisaillement des piles	12
Figure I.4:	Choc à cause des poids lourds hors gabarit contre l'intrados du pont	13
Figure I.5:	Corrosion des armatures d'une pile de pont (AFCG, 2003)	15
Figure I.6:	Exemples de dégradations d'ouvrages dues à l'alcali-réaction	15
Figure I.7:	Poutre exposée aux chlorures en bord de mer	16
Figure I.8:	Dégradation des éléments d'un ouvrage par carbonatation	17
Figure I.9:	Chemisage en béton d'un poteau en béton armé	21
Figure I.10:	Chemisage par acier	22
Figure I.11:	Application de la précontrainte externe pour réparer les ponts à poutres	23
Figure I.12:	Description des principales applications du renforcement par composites collés sur ouvrages de génie civil	29
Figure I.13:	Construction d'un Monocouche	36
Figure I.14:	Construction d'un stratifié	37
Figure I.15:	Application de bandes de renfort sur la face inférieure d'une dalle et sur une poutre	38
Figure I.16:	Application de renfort sur la face d'un poteau	39
Figure II.1:	Schéma d'un neurone	44
Figure II.2:	Comparaison entre le neurone biologique et le neurone artificiel	46
Figure II.3:	Les types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel	49
Figure II.4:	Architecture du réseau de neurone monocouche	50
Figure II.5:	Architecture des réseaux de neurones multicouches (MLPs)	50
Figure II.6:	Apprentissage supervisé	52
Figure II.7:	Apprentissage non-supervisé	52
Figure III.1:	Structures composites hélicoïdales bio- inspirées	67
Figure III.3:	Poutre en béton endommagée et renforcée par une plaque FRP bio-inspirée.	70
Figure III.3:	Forces d'équilibre d'une bande infinitésimale d'une poutre en béton armé suivant l'axe X	70
Figure III.4:	A Représentation schématique des plaques composites stratifiées	71
Figure III.5:	Effet de différents nombres de couches sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA renforcée et soumise aux charges combinées ($\phi = 0,3$, Phase 3)	88
Figure III.6:	Effet de l'orientation des fibres sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA renforcée et soumise aux charges combinées (N=28, $\phi = 0,3$, Phase 3)	89
Figure III.7:	Effet de la variation du type de chargement sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA renforcée (HS, N=28, $\phi = 0,3$)	91
Figure III.8:	Effet de la longueur de la poutre en BA sur les contraintes interfaciales (HS, N=28, $\phi = 0,3$, Phase 3)	92
Figure III.9:	Effet du degré d'endommagement à différentes phases sur les contraintes interfaciales (HS, N=28)	93

Figure III.10: Effet de l'épaisseur de la plaque sur les contraintes interfaciales (HS, N=28, $\phi = 0,3$, Phase 3).	95
Figure III.11: Effet du module d'Young de la plaque sur les contraintes interfaciales (HS, N=28, $\phi = 0,3$, Phase 3)	96
Figure III.12: Effet de module d'Young de la poutre sur les contraintes interfaciales (HS, N=28, $\phi = 0,3$, Phase 3)	97
Figure III.13: Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur les contraintes interfaciales (HS, N=28, $\phi = 0,3$, Phase 3)	99
Figure III.14: Effet de module d'Young d'adhésion sur les contraintes interfaciales (HS, N=28, $\phi = 0,3$, Phase 3)	100
Figure IV.1: Analyse de régression entre la sortie et la cible pour l'ensemble des données.	109
Figure IV.2: Coefficient de corrélation en fonction du nombre de neurones dans les couches cachées	110
Figure IV.3: Architecture utilisée dans le modèle de réseau neuronal	111
Figure IV.4: Architecture utilisée dans le modèle de réseau neuronal (18-19-2) - cas de renforcement en monocouche -	112
Figure IV.5: Analyse de régression entre la sortie et la cible pour l'ensemble des données - cas de renforcement en monocouche -	114
Figure IV.6: MSE et R en fonction du nombre de neurones dans la couche cachée - cas de renforcement en monocouche -	115
Figure IV.7: Comparaison des contraintes interfaciales dans les poutres en BA renforcées avec une plaque CFRP	117
Figure IV.8: Maillage en éléments finis du modèle au bord de la plaque	120
Figure IV.9: Comparaison des contraintes interfaciales dans les poutres en BA renforcées avec des plaques en CFRP (HS, N=16, $\alpha = 0$, Phase 1).	122
Figure IV.10: Effet de différents nombres de couches sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA poreuse renforcée et soumise aux charges combinées ($\alpha = 0,1$, Phase 3)	128
Figure IV.11: Effet de l'orientation des fibres sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA renforcée et soumise aux charges combinées (N=32, $\alpha = 0,1$, Phase 3)	130
Figure IV.12: Effet de la variation du type de chargement sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA renforcée (HS, N = 32, $\alpha = 0,1$)	132
Figure IV.13: Impact du pourcentage de bulles d'air à différentes phases sur les contraintes interfaciales (HS, N=32)	133
Figure IV.14: Effet de la longueur de la poutre en BA sur les contraintes interfaciales (HS, N=32, $\alpha = 0,3$, Phase 3)	134
Figure IV.15: Effet de l'épaisseur et du module d'Young de la plaque sur les contraintes interfaciales (HS, N=32, $\alpha = 0,1$, Phase 3)	136
Figure IV.16: Effet de module de Young de la poutre sur les contraintes interfaciales (HS, N=32, $\alpha = 0,1$, Phase 3)	138
Figure IV.17: Effet de l'épaisseur et du module d'Young de l'adhésif sur les contraintes interfaciales (HS, N=32, $\alpha = 0,1$, Phase 3)	139

Liste des Tableaux

Tableau I.1 :	Propriétés des fibres de verre type E et S	34
Tableau I.2 :	Propriétés mécaniques caractéristiques des composite	38
Tableau III.1 :	Variation de la configuration des modèles hélicoïdaux en fonction du nombre de couches.	71
Tableau III.2 :	Propriétés géométriques et matérielles de la poutre renforcée	81
Tableau III.3 :	Contraintes interfaciales d'une poutre en béton armé renforcée avec une plaque en CFRP	81
Tableau III.4 :	Comparaison des contraintes interfaciales d'une poutre en béton armé renforcée avec une plaque en CFRP soumises à différents Chargements	82
Tableau III.5 :	Effet de la variation du module de Young de la plaque de renfort CFRP sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA endommagée et renforcée ($\phi = 0,3$, Phase 3)	83
Tableau III.6 :	Contraintes d'interfaces d'une poutre en BA endommagée ($\phi = 0,3$) renforcée par une plaque en CFRP et soumise à différents types de charges	84
Tableau III.7 :	Effet de la variation du module de Young du béton sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA endommagée et renforcée par une plaque CFRP (N = 28)	86
Tableau IV.1 :	Caractéristiques des données d'entraînement	107
Tableau IV.2 :	Paramètres statistiques de la base de données	113

Liste des notations

- E_b : module d'élasticité longitudinal du béton
 \tilde{E}_b : module d'élasticité à état endommagé longitudinal du béton
 E_f : module d'élasticité longitudinal de la plaque de renforcement
 E_a : module d'élasticité longitudinal de la couche d'adhésif
 G_a : module de cisaillement transversal du béton
 G_f : module de cisaillement transversal de la plaque de renforcement
 G_a : module de cisaillement transversal de la couche d'adhésif
 α_b : coefficient de dilatation thermique du béton
 α_f : coefficient de dilatation thermique de la plaque de renforcement
 β_b : coefficient hygroscopique du béton
 β_f : coefficient hygroscopique de la plaque de renforcement
 a : distance entre l'appui et le bord de la plaque
 b_b : la largeur de la poutre
 b_f : la largeur de la plaque de renforcement
 b_a : la largeur de la couche d'adhésif
 t_b : l'épaisseur de la poutre
 t_f : l'épaisseur de la plaque de renforcement
 t_a : l'épaisseur de la couche d'adhésif
 Φ : paramètre d'endommagement du béton
 α : étendue des bulles d'air dans le béton
 L : longueur de la poutre
 L_P : longueur de la plaque
 q : charge uniformément répartie
 $\varepsilon_b(x)$: déformation due aux sollicitations longitudinales dans le béton
 $\varepsilon_f(x)$: déformation due aux sollicitations longitudinales dans la plaque de renforcement
 $[A]$: la matrice de rigidité en extension
 $[D]$: la matrice de rigidité en flexion
 $[A']$: l'inverse de la matrice de rigidité en extension
 $[D']$: l'inverse de la matrice de rigidité en flexion
 $\bar{Q}_{m,n}$: représente le tenseur élastique de Hooke
 θ : angle d'orientation des fibres
 K : le nombre de couches dans la plaque de renforcement
 ΔT : variation de la température
 ΔC : la variation de l'humidité
 I_b : Inertie de la poutre
 I_f : Inertie de la plaque de renforcement
 I_a : Inertie de la couche d'adhésif
 M_T : Moment fléchissant total appliqué à la poutre
 V_T : effort tranchant appliqué à la section totale
FRP : Polymère Renforcé De Fibres
CFRP : Polymère renforcé de fibres de carbone
GFRP : Polymère renforcé de fibres de verre
 $\sigma(x)$: contraintes d'interface normales
 $\tau(x)$: contraintes d'interface de cisaillement
RNA : Réseaux De Neurones Artificiels
MSE : l'erreur quadratique moyenne
 R : Corrélacion de Pearson

Introduction Générale

Introduction Générale

Les infrastructures en béton armé, omniprésentes dans notre environnement, constituent l'épine dorsale de nos sociétés modernes. Ponts, bâtiments, tunnels, barrages – ces structures sont conçues pour une durée de vie importante, supportant des charges considérables et résistant aux aléas du temps. Cependant, malgré leur robustesse apparente, elles sont sujettes à une dégradation progressive sous l'influence de divers facteurs, compromettant leur intégrité structurelle et leur durabilité.

Les causes de dégradation sont multiples et variées. Les agressions physiques, telles que les cycles de gel-dégel ou l'érosion, fragilisent la matrice du béton. Les contraintes mécaniques, comme les séismes ou les surcharges, peuvent engendrer des fissures et des déformations. Les réactions chimiques, notamment la corrosion des armatures ou l'attaque sulfatique, altèrent la composition du béton et diminuent sa résistance.

La réhabilitation des ouvrages dégradés représente un enjeu majeur pour la sécurité des usagers et la pérennité des infrastructures. Différentes techniques traditionnelles ont été développées pour renforcer les structures en béton armé, comme le chemisage en acier ou en béton, la précontrainte externe, le renforcement par plaques d'acier. Ces méthodes, éprouvées par le temps, permettent d'améliorer la capacité portante et la durabilité des ouvrages. Cependant, elles présentent des limitations intrinsèques, notamment en termes de poids, de coût, de complexité de mise en œuvre et de sensibilité à la corrosion.

Face à ces contraintes, les matériaux composites, en particulier les polymères renforcés de fibres (FRP), ont émergé comme une alternative prometteuse. Les FRP, légers, résistants mécaniquement et insensibles à la corrosion, offrent de nombreux avantages. Leur utilisation dans le domaine du génie civil s'étend rapidement, permettant de renforcer la flexion des poutres et des dalles, d'améliorer la résistance au cisaillement, de confiner les colonnes et de réparer les dalles endommagées.

Malgré ces avantages, l'un des principaux modes de défaillance observés dans les poutres renforcées par des stratifiés composites à liaison externe est le décollement en bout de plaque, où le stratifié se détache du béton au niveau du bord de la plaque sous l'effet de la charge. Ce mécanisme de défaillance a fait l'objet d'une attention considérable de la part des chercheurs au cours des dernières décennies, car il affecte de manière critique l'intégrité structurelle et les performances à long terme des systèmes modernisés. Le décollement de l'extrémité de la plaque est donc un élément central du développement et de l'optimisation des stratégies de renforcement

des stratifiés composites. La recherche a démontré que les contraintes élevées de cisaillement et de décollement interfaciaux, particulièrement concentrées sur les bords des plaques collées, sont les principaux facteurs contribuant à la rupture des stratifiés composites collés à l'extérieur. Ces contraintes ont tendance à s'accumuler à l'interface entre le stratifié composite et le béton sous-jacent, ce qui rend la ligne de liaison susceptible de se détacher sous l'effet de la charge. Les premières approches analytiques pour évaluer ces contraintes ont souvent simplifié la couche adhésive en la modélisant comme un matériau élastique linéaire, ce qui a fourni un cadre initial pour comprendre les distributions de contraintes dans le système collé [1-3].

Des études expérimentales approfondies [4-8] et des analyses analytiques ont été menées pour examiner les contraintes interfaciales dans les poutres plaquées. Tounsi [9] a présenté une analyse théorique améliorée de la distribution des contraintes interfaciales dans les poutres en béton renforcées par des plaques en plastique renforcé de fibres (FRP). L'innovation clé réside dans l'inclusion des déformations de cisaillement des adhérents, qui sont souvent négligées dans les modèles existants. Greco, Lonetti [10] ont présenté un modèle analytique amélioré pour étudier les phénomènes de décollement dans les poutres en béton ou en acier renforcées par des plaques composites collées à l'extérieur. Le modèle se concentre sur l'analyse des problèmes typiques de décollement des bords induits par une fracture interfaciale à l'interface poutre-adhésif. Yang and Wu [11] ont étudié l'influence de la déformation par cisaillement sur les contraintes interfaciales, en présentant un modèle analytique amélioré qui intègre cet effet critique. Li, Guo [12] étudie la distribution des contraintes interfaciales dans les poutres en béton armé (BA) renforcées par des composites hybrides à base de feuilles de fibres de carbone (CFS) et de fibres de verre (GFS). L'analyse utilise une méthode d'éléments finis non linéaire (FEM) pour simuler l'ensemble du processus de décollement des feuilles de fibres. L'influence de la déformation par cisaillement sur les contraintes interfaciales dans les poutres plaquées soumises à une charge arbitraire est étudiée par Narayanamurthy, Chen [13]. Ghafoori and Motavalli [14] ont examiné le comportement en flexion et les contraintes interfaciales des poutres métalliques renforcées par des plaques collées précontraintes. L'analyse prend en compte les effets du niveau de précontrainte, les propriétés géométriques et mécaniques de la plaque et de la poutre en l'acier sur le comportement en flexion et les contraintes interfaciales. Kim, Shin [15] ont étudié la relation entre les contraintes de cisaillement interfaciales et les capacités de moment des poutres en BA renforcées avec différentes plaques de FRP. Ils ont analysé l'influence de différents types de FRP, y compris les plaques de fibres de carbone (CFRP), les plaques de fibres de verre (GFRP) et les plaques de fibres d'aramide (AFRP). Leur étude a fourni des informations précieuses sur

l'efficacité et le comportement d'adhérence des poutres en béton armé avec les plaques en FRP. L'auteur a utilisé l'analyse par éléments finis (FEM) pour évaluer le comportement en flexion de poutres en béton armé initialement endommagées puis réparées avec des plaques de polymère renforcé par des fibres (FRP). L'étude visait à évaluer l'efficacité de la réparation par le FRP pour restaurer la résistance et de la rigidité des poutres endommagées et à comprendre la distribution des contraintes dans la structure réparée [16]. Daouadji [17] a étudié la modélisation analytique et numérique des contraintes interfaciales dans les poutres collées avec une plaque mince. L'étude a analysé la distribution et l'ampleur des contraintes à l'interface entre la poutre et la plaque dans différentes conditions de chargement. Thomas and Ramadass [18] ont étudié l'applicabilité du modèle SST (Softened Strut-and-Tie), développé à l'origine pour les poutres profondes renforcées par de l'acier, pour prédire le comportement de poutres similaires renforcées par des barres GFRP. Plusieurs études ont évalué l'analyse en flexion et la contrainte interfaciale pour les poutres renforcées avec des plaques composites en utilisant la modélisation analytique, les méthodes d'éléments finis et les techniques expérimentales [19-28].

Récemment, Zhang, Gu [29] ont analysé le comportement de l'interface acier-CFRP sous l'effet de la température et du fluage. Le modèle élastique prédit le glissement interfacial, la tension de la plaque CFRP et la déformation de l'acier, avec une précision vérifiée par l'analyse par éléments finis. Calabrese, Colombi [30] ont présenté une solution analytique pour le comportement complet des joints collés entre des plaques de FRP et des poutre en acier.[31] nt présenté un nouveau modèle pour prédire la résistance à la flexion des poutres en BA renforcées avec des plaques de CFRP.

Cependant, l'utilisation des FRP soulève également des défis. La compréhension du comportement de l'interface entre le FRP et le béton est cruciale pour garantir l'efficacité du renforcement. Les contraintes interfaciales, notamment aux extrémités des plaques de FRP, peuvent entraîner un délaminage et compromettre la performance de la structure.

L'étude des contraintes interfaciales nécessite des modèles analytiques précis. Ces modèles permettent de prédire la distribution des contraintes et d'optimiser la conception du renforcement en fonction des conditions de chargement et des propriétés des matériaux. Afin d'améliorer la prédiction de ces contraintes et de tenir compte de la complexité des phénomènes en jeu, l'intégration des réseaux de neurones artificiels (RNA) s'avère particulièrement pertinente.

Les RNAs, en tant que modèles computationnels inspirés du fonctionnement du cerveau humain, sont capables d'apprendre à partir de données, d'identifier des patterns et de réaliser des

prédictions. Leur application dans le domaine du génie civil se développe rapidement, offrant de nouvelles perspectives pour la conception, l'analyse et la gestion des structures.

Cette thèse se propose d'explorer l'application des RNAs pour prédire les contraintes interfaciales dans les poutres en béton armé renforcées par des plaques composites de type bio-inspiré. La validation de ce modèle a été réalisée par une modélisation avec la méthode des éléments finis via le logiciel Abaqus, assurant la précision des prévisions du modèle.

Cette thèse est structurée en quatre chapitres :

Chapitre I : Ce chapitre présente une revue des pathologies et des mécanismes de dégradation affectant les structures en béton armé. Il expose également les techniques de réhabilitation et de renforcement traditionnelles et innovantes, en mettant l'accent sur les avantages et les défis liés à l'utilisation des composites FRP.

Chapitre II : Ce chapitre introduit une introduction à la méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA), incluant les principes fondamentaux, les modèles, les algorithmes d'apprentissage et les métriques d'évaluation des performances. Il met également en lumière les applications des RNA dans le domaine de l'ingénierie, en particulier dans le génie civil.

Chapitre III : Ce chapitre présente une étude analytique du comportement d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque composite de type bio-inspiré. Le modèle analytique développé permet de prédire les contraintes interfaciales normales et de cisaillement en tenant compte des effets hygro-thermo-mécaniques. Une étude paramétrique est également menée pour identifier l'influence de différents paramètres structurels et matériels sur le comportement de l'interface.

Chapitre IV : Ce chapitre explore l'application des RNAs pour prédire les contraintes interfaciales dans les poutres en béton armé renforcées par des plaques composites bio-inspirées. Un modèle RNA est développé et entraîné à partir de données analytiques et numériques. Les résultats obtenus sont comparés avec le modèle analytique élaboré au chapitre III. La validation de cette approche RNA est renforcée par une modélisation avec la méthode des éléments finis via le logiciel Abaqus, ce qui met en évidence son potentiel pour la prédiction du comportement des structures renforcées.

**Chapitre I : Pathologies, Mécanismes
de Dégradation des Structures et
Techniques de Réhabilitation et de
Renforcement**

I.1. Introduction

Les infrastructures de génie civil, telles que les ponts, les tunnels et les bâtiments, représentent les fondements de notre cadre de vie moderne. Conçues pour supporter des charges multiples sur de longues périodes et dans des conditions climatiques souvent sévères, ces structures sont pourtant vulnérables à une détérioration progressive sous l'influence de divers facteurs. La durabilité, la résistance et la stabilité de ces ouvrages peuvent ainsi être compromises, menaçant leur intégrité et la sécurité des utilisateurs. Parmi les principales causes de détérioration des structures en béton figurent des facteurs chimiques, physiques et mécaniques. D'un point de vue chimique, des déséquilibres dans la composition du béton peuvent provoquer des phénomènes tels que la carbonatation, la réaction alcali-granat ou la corrosion des armatures, affaiblissant ainsi la structure. Les agressions physiques, telles que le retrait, les cycles de gel-dégel et les variations thermiques, exercent également une pression considérable sur les matériaux. Enfin, les contraintes mécaniques, comme les tremblements de terre ou les charges excessives, peuvent provoquer des fissures ou des dommages structurels plus graves.

Face à ces risques, une analyse minutieuse des pathologies des ouvrages s'avère cruciale pour identifier les causes précises de la dégradation et proposer des solutions de réparation ou de renforcement appropriées. L'étude pathologique des structures en béton armé exige une expertise pluridisciplinaire, mêlant des connaissances en chimie, en physique, en mécanique et en ingénierie. Cette approche globale permet de définir des stratégies de prévention et de réhabilitation adaptées, assurant ainsi la durabilité et la sécurité à long terme de ces infrastructures. Le béton armé, qui constitue le matériau principal de nombreuses infrastructures critiques, se trouve au cœur de ces problématiques. Bien que reconnu pour sa résistance, il reste vulnérable à divers phénomènes de dégradation, tels que la corrosion des armatures ou la formation de fissures, qui, à terme, peuvent compromettre ses capacités structurelles.

La réhabilitation des structures en béton revêt une importance majeure. Non seulement elle permet de prolonger la durée de vie des ouvrages, mais elle assure également la sécurité des utilisateurs en prévenant les risques d'effondrement. Les interventions de renforcement permettent, entre autres, d'augmenter la capacité portante des structures, de contrôler les fissures et d'améliorer la résistance face aux agressions extérieures. Le choix des techniques de réhabilitation et de renforcement dépend toutefois de nombreux facteurs, tels que l'étendue des dommages, les exigences de performance ou encore les contraintes spécifiques du chantier. Ces interventions permettent non seulement de restaurer les performances structurelles, mais aussi d'adapter les ouvrages aux normes contemporaines en matière de sécurité et de durabilité.

I.2. Types courants de dégradation dans les ouvrages en béton

Les pathologies des ouvrages en béton peuvent être regroupées en trois catégories principales, chacune résultant de différentes influences et facteurs.

I.2.1. Pathologies d'origine physique

Les pathologies d'origine physique résultent de phénomènes naturels qui affectent les propriétés du béton. Elles incluent :

I.2.1.1. Action de gel-dégel

L'action de gel-dégel constitue un processus physique susceptible d'entraîner une dégradation significative du béton. Ce phénomène se produit lorsque l'eau pénètre dans les pores du béton et gèle. Lorsque l'eau gèle, elle se dilate, générant ainsi des contraintes internes pouvant fissurer le béton. Les cycles répétés de gel-dégel peuvent entraîner une dégradation importante, en particulier dans les climats froids.

Le mécanisme du gel-dégel comprend plusieurs étapes :

- **Pénétration de l'eau** : L'eau peut s'infiltrer dans le béton par le biais des pores et des fissures. La porosité et la perméabilité du béton déterminent la quantité d'eau susceptible de pénétrer.
- **Gel de l'eau** : Lorsque la température descend en dessous de 0 °C, l'eau gèle et se dilate. Cette dilatation engendre des contraintes internes dans le béton.
- **Fissuration** : Si les contraintes internes dépassent la résistance à la traction du béton, des fissures se forment.
- **Propagation des fissures** : Les cycles répétés de gel-dégel peuvent conduire à la propagation des fissures et à la dégradation du béton [32].

Divers facteurs influencent le degré de dégradation par gel-dégel :

- **Porosité et perméabilité du béton** : Un béton plus poreux et perméable absorbera davantage d'eau, ce qui augmentera le risque de dégradation par gel-dégel [33].
- **Degré de saturation** : Le risque de dégradation est accru lorsque le béton est saturé d'eau.
- **Température** : Des cycles de gel-dégel plus fréquents et intenses provoqueront une dégradation plus rapide [34].
- **Présence de sels de déverglaçage** : Les sels de déverglaçage peuvent accroître le risque de dégradation par gel-dégel en abaissant le point de congélation de l'eau et en augmentant les cycles de gel-dégel.

I.2.1.2. Erosion et abrasion

L'érosion et l'abrasion représentent deux mécanismes principaux d'usure physique nuisibles à la durabilité des structures en béton armé. L'érosion, principalement induite par l'action de l'eau, du vent ou d'autres forces naturelles, peut se manifester sous différentes formes, telles que la cavitation, où des ondes de choc générées par l'effondrement de bulles d'air endommagent le béton, l'érosion par abrasion, résultant du frottement de particules solides transportées par l'eau contre la surface du béton, et l'érosion par corrosion, où l'eau dissout les composants du béton, le rendant plus susceptible à l'usure.

L'abrasion, quant à elle, est causée par le frottement continu de matériaux solides, comme le passage répété de véhicules lourds sur une chaussée en béton. La qualité du béton, la vitesse de l'eau, la présence de particules solides et les conditions environnementales, particulièrement dans les zones côtières ou industrielles, sont autant de facteurs qui influencent l'intensité de l'érosion et de l'abrasion sur les structures en béton.

I.2.1.3. Exposition aux incendies

Le béton est un matériau relativement résistant au feu, mais une exposition prolongée à des températures élevées peut entraîner une dégradation significative (la température devant être supérieure à 800 °C). Les incendies peuvent provoquer la fissuration, l'écaillage et la perte de résistance du béton [35].

Il convient de noter que les dommages les plus importants observés sur les structures en béton armé sont souvent dus aux armatures plutôt qu'au béton lui-même. Sous l'effet de la chaleur, les armatures se dilatent et peuvent subir une diminution notable de leur résistance, affectant ainsi la capacité portante et la stabilité structurelle.



Figure I.1: Illustration d'un béton faïencé dans un tunnel suite à un incendie [36]

Bien que le béton soit généralement plus résistant au feu que l'acier et le bois, cette résistance est limitée dans le temps. Les incendies entraînent des modifications des propriétés physiques et mécaniques des matériaux, se manifestant par l'éclatement et l'écaillage du béton et, dans des cas extrêmes, par la fusion des composants (Figure I.1).

I.2.1.4. Retrait du béton

Le retrait du béton constitue une préoccupation majeure dans le domaine de l'ingénierie, étant à l'origine de plus de 80 % des fissures observées dans ce matériau [37, 38]. Ce phénomène physique se produit lorsque le béton sèche, engendrant une contraction volumétrique du matériau qui peut entraîner des fissures et des déformations, affectant à la fois l'esthétique et la durabilité de la structure.

La déformation de retrait autogène à un âge précoce représente entre 50 et 100 % de la déformation de retrait totale, en particulier dans le béton moderne [39]. L'apparition de fissures à un stade précoce dans le béton contribue de manière significative à la réduction de sa fonctionnalité ainsi qu'à la détérioration de la durabilité et de la sécurité des structures en béton [40].

Il existe plusieurs types de retrait du béton :

- **Retrait plastique** : Se produit avant la prise du béton et est causé par l'évaporation de l'eau.
- **Retrait de séchage** : Ce type de retrait se réfère à la contraction subie par le béton lorsque sa teneur en eau s'évapore vers l'extérieur. Au cours du séchage, le déséquilibre thermodynamique généré provoque un échange de vapeur d'eau de la matrice cimentaire vers l'environnement extérieur (Figure I.2). Le retrait de séchage d'un mélange est directement lié à sa perte de masse.
- **Retrait thermique** : Ce phénomène peut être à l'origine de fissures prématurées dans le béton. Lors du processus de prise et de durcissement du béton, de la chaleur est dégagée, entraînant une contraction du matériau lors de son refroidissement. Ce phénomène est accentué par les effets de masse, où la température d'hydratation peut être plus élevée au sein de parties massives de la structure et plus faible près des parois en raison des échanges thermiques avec l'environnement extérieur.
- **Retrait endogène** : Ce type de retrait se produit en raison de réactions chimiques dans le béton, même en l'absence de séchage.

Plusieurs facteurs influencent le retrait du béton, notamment : le rapport eau/ciment, le type de ciment, les granulats, ainsi que la température et l'humidité ambiantes, sans oublier les dimensions de l'élément en béton. Parmi les différents types de retrait, le retrait de séchage est

considéré comme le plus important dans les composites conventionnels à base de ciment [41]. Essentiellement, le retrait de séchage du béton fait référence à la diminution du volume du béton au cours du processus de durcissement, provoquée par l'évaporation de l'eau.

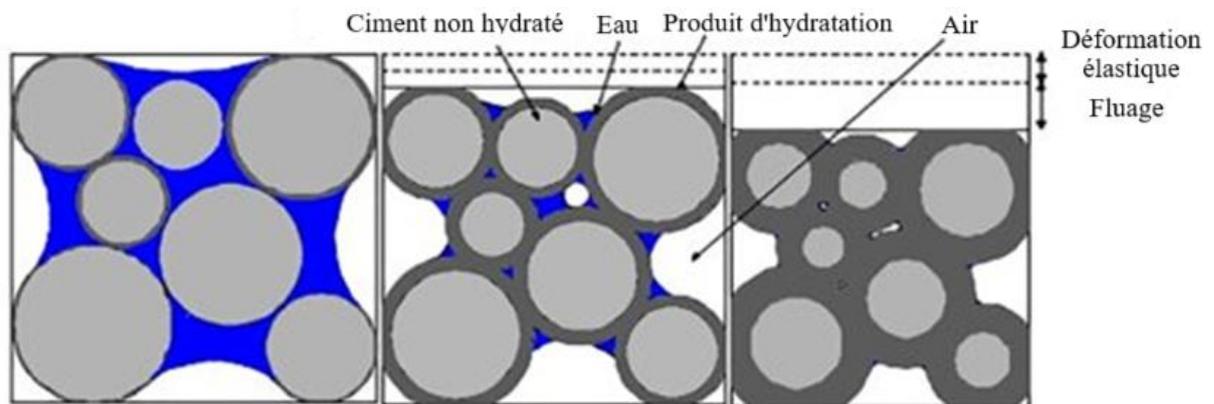


Figure I.2: Représentation schématique du retrait autogène de la pâte de ciment durcissant [42]

I.2.2. Pathologies d'origine mécanique

Les pathologies d'origine mécanique résultent de contraintes excessives, de forces externes ou de charges anormales appliquées aux structures en béton armé. Ces dégradations peuvent se manifester sous diverses formes, notamment :

I.2.2.1. Surcharge et fatigue structurelle

Les structures en béton armé sont conçues pour supporter des charges spécifiques, définies lors de la phase de dimensionnement. Ces charges incluent le poids propre de la structure, les charges d'exploitation (permanentes et variables) ainsi que les charges exceptionnelles (vent, neige, séisme, etc.).

Cependant, il peut arriver que les structures soient soumises à des charges supérieures à celles initialement prévues. Cela peut résulter de surcharges accidentelles, d'une modification de l'utilisation de la structure ou d'une augmentation du trafic au fil du temps. Lorsque les charges appliquées dépassent la capacité portante de la structure [43], des dommages peuvent se produire, tels que des fissures, des déformations et, dans les cas les plus graves, l'effondrement.

De plus, les structures en béton armé peuvent être exposées à des charges répétées, telles que celles du trafic routier ou des vibrations générées par des machines [44]. Ces charges répétées peuvent entraîner une fatigue structurelle, se caractérisant par la formation et la propagation de fissures au fil du temps [45]. La fatigue structurelle peut diminuer considérablement la résistance et la durabilité d'une structure [43].

I.2.2.2. Séisme

Les séismes, également appelés tremblements de terre, peuvent engendrer des dommages considérables aux structures en béton armé. Les ondes sismiques ont la capacité de faire vibrer et de déplacer les fondations d'une structure, ce qui peut entraîner des contraintes de cisaillement et de flexion au sein des éléments structuraux [46]. Ces contraintes peuvent provoquer des fissures, des déformations, et dans les cas les plus graves, l'effondrement de la structure (Figure I.3).

Les dommages infligés aux structures en béton armé par les séismes sont tributaires de divers facteurs, tels que la magnitude et la durée du séisme, le type de sol, ainsi que la conception et la construction de la structure. Les sols mous amplifient les ondes sismiques, augmentant ainsi les risques de dommages. Cependant, les structures correctement conçues et réalisées présentent une meilleure résilience. Les défauts d'exécution, la faible résistance du béton et les armatures inadéquates constituent des causes majeures d'effondrement. Ces problèmes découlent fréquemment d'un espacement inapproprié des armatures, de la résistance du béton et de la granulométrie des agrégats [47].



Figure I.3: Ruptures par cisaillement des piles [48]

Les dommages typiques observés à la suite d'un séisme incluent la formation de fissures dans le béton, des déformations des éléments structuraux, la rupture des armatures en acier sous l'effet des contraintes de traction et de cisaillement, et dans les cas les plus graves, l'effondrement total de la structure.

I.2.2.3. Tassements différentiels des fondations

Le tassement différentiel des fondations se produit lorsque les fondations d'une structure se tassent de manière non uniforme. Lorsque les fondations se tassent différemment, il peut en

résulter des contraintes de cisaillement et de flexion dans les éléments structurels. Ces contraintes peuvent entraîner des fissures et des déformations et, dans les cas les plus graves, un effondrement. Cela peut être dû à un certain nombre de facteurs tels que des variations de la capacité portante du sol ou un remblai non compacté ou des charges non uniformément réparties sur l'ouvrage.

I.2.2.4. Chocs

Les structures en béton armé peuvent être soumises à des chocs accidentels tels que les collisions de véhicules de poids lourds, des chutes d'objets ou des explosions [49], comme illustré dans la Figure I.4, qui montre un choc causé par des poids lourds hors gabarit contre l'intrados d'un pont. Ces chocs peuvent causer des dommages importants au béton et aux armatures, affectant la résistance et la stabilité de la structure.

Ils créent des épaufrures, des éclats importants du béton voire des ruptures d'aciers affectant ainsi directement la capacité portante de l'ouvrage.



Figure I.4: Choc à cause des poids lourds hors gabarit contre l'intrados du pont [50]

I.2.2.5. Fatigue des matériaux

La fatigue des matériaux se manifeste lorsque ceux-ci sont soumis à des charges cycliques ou répétées, même lorsque ces charges demeurent en deçà de la limite d'élasticité du matériau. Au fil du temps, ces contraintes répétitives peuvent entraîner la formation et la propagation de microfissures, pouvant finalement conduire à la rupture du matériau.

Le béton, bien qu'il soit robuste en compression, présente une résistance à la traction inférieure. La fatigue du béton se traduit principalement par l'apparition et la propagation de

microfissures dans sa matrice cimentaire. Ces fissures peuvent émerger à partir de défauts internes du béton, tels que des pores ou des inclusions, ou dans des zones de concentration de contraintes.

L'acier, matériau ductile capable de supporter des déformations plastiques importantes avant d'atteindre son point de rupture, peut également subir des phénomènes de fatigue lorsqu'il est soumis à des charges cycliques dépassant sa limite d'endurance. Ce phénomène se caractérise par l'apparition et la propagation de fissures, susceptibles de provoquer la rupture des armatures.

Plusieurs facteurs influent sur la fatigue des matériaux, notamment l'amplitude et la fréquence des charges cycliques [51]. De plus, la résistance à la fatigue varie en fonction du type de matériau, tandis que des environnements agressifs, tels que les milieux marins ou industriels, peuvent également accélérer ce processus.

I.2.3. Pathologies d'origine chimique

Les pathologies d'origine chimique sont causées par des réactions chimiques entre les composants du béton et des substances externes. Les principales pathologies chimiques sont :

I.2.3.1. Corrosion des armatures

La liaison entre l'armature et le béton constitue l'un des facteurs les plus déterminants affectant la performance des structures en béton armé [52]. La corrosion des armatures en acier représente un processus électrochimique qui survient lorsque l'acier est exposé à l'humidité et à l'oxygène. Dans le béton armé, l'acier est généralement protégé contre la corrosion grâce à la nature alcaline du béton, laquelle forme une couche passive protectrice sur la surface de l'acier.

Cependant, cette protection peut être compromise par des facteurs tels que la carbonatation du béton et la pénétration de chlorures [53], comme le montre la Figure I.5, qui illustre la corrosion des armatures d'une pile de pont.

La corrosion des armatures dans le béton constitue un processus en deux étapes :

- La phase d'incubation correspond à la période durant laquelle les agents agressifs pénètrent dans l'enrobage de béton, exposant ainsi l'acier à l'humidité et à l'oxygène.
- La phase de propagation se réfère au développement de la corrosion, entraînant la formation de rouille.

Plusieurs facteurs influencent ce processus, notamment la carbonatation du béton, le cycle gel-dégel, l'humidité, l'érosion due aux sels chlorés et la température [54].



Figure I.5: Corrosion des armatures d'une pile de pont (AFCG, 2003)

I.2.3.2. Alkali-réactions

L'alkali-réaction constitue une pathologie autogène du béton, fréquemment rencontrée dans de nombreux ouvrages construits avant sa reconnaissance officielle [55]. Cette réaction chimique se produit entre la silice présente dans les granulats et les alcalins contenus dans la pâte de ciment. Elle engendre un gonflement du béton et la formation de fissures, compromettant ainsi la durabilité et la résistance de la structure. Les effets de cette pathologie sont illustrés dans la Figure I.6, qui montre des exemples de dégradations d'ouvrages dues à l'alkali-réaction.

Les conditions nécessaires à son apparition et à son développement incluent une quantité suffisante d'alcalins, des granulats classés comme réactifs, ainsi qu'une humidité relative interne élevée, c'est-à-dire supérieure à 70 % [55].

La réaction chimique génère un gel silico-alkalin en expansion, provoquant des contraintes de traction microscopiques dans et autour des agrégats réactifs. À mesure que la réaction progresse et que le volume des gels produits augmente, les effets deviennent visibles à l'échelle macroscopique.



Figure I.6: Exemples de dégradations d'ouvrages dues à l'alkali-réaction[56]

I.2.3.3. Attaque sulfatique

L'attaque sulfatique constitue une réaction chimique survenant lorsque le béton est exposé à des sulfates [57]. Ces sulfates peuvent provenir de sources externes, telles que l'eau de mer, les eaux usées ou le sol, ou de sources internes, comme des granulats contenant des sulfates [58], sont particulièrement nuisibles dans les environnements marins, comme le montre la Figure I.7, illustrant une poutre exposée aux chlorures en bord de mer.

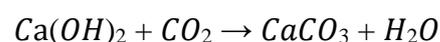
La réaction entre les sulfates et les composants du ciment, principalement l'aluminate tricalcique (C_3A) et l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$), engendre des composés expansifs, tels que l'étringite et le gypse [59]. L'expansion de ces composés peut provoquer la fissuration et la dégradation du béton.



Figure I.7: Poutre exposée aux chlorures en bord de mer

I.2.3.4. Carbonatation

La carbonatation est une réaction chimique intervenant entre le dioxyde de carbone de l'air et la chaux présente dans le béton [60]. Ce processus de carbonatation, qui progresse dans le béton à partir des surfaces en contact avec l'atmosphère, entraîne une diminution du pH du béton, neutralisant ainsi progressivement son alcalinité et son rôle passivant vis-à-vis des armatures, qui, n'étant plus protégées, sont sujettes à la corrosion [61]. Ce phénomène est illustré dans la Figure I.8, qui montre la dégradation des éléments d'un ouvrage par carbonatation.



La vitesse de carbonatation dépend de divers facteurs et son évolution est d'autant plus lente que le phénomène se développe, car le carbonate formé freine la diffusion du gaz

carbonique, comme la concentration en CO_2 , l'humidité, température et porosité et perméabilité du béton [61].



Figure I.8: Dégradation des éléments d'un ouvrage par carbonatation [62]

I.2.4. Autres mécanismes de dégradation

Outre les pathologies d'origine mécanique, physique et chimique, les structures en béton armé peuvent également être affectées par d'autres mécanismes de dégradation, notamment :

I.2.4.1. Désordres liés aux erreurs de conception ou d'exécution

Aucune étude de conception des ouvrages ne peut être exhaustive en raison des nombreux détails à prendre en compte lors de la modélisation, qui implique nécessairement une simplification.

Les erreurs de conception et d'exécution peuvent engendrer divers problèmes au sein des ouvrages en béton armé, compromettant leur fonctionnalité et leur sécurité. Ces erreurs peuvent survenir à différentes étapes du processus de construction, de la conception initiale à la mise en œuvre du béton.

Au niveau de la conception, un dimensionnement inapproprié, tel qu'une sous-estimation des charges (notamment des charges d'exploitation) ou une évaluation incorrecte des propriétés des matériaux, peut entraîner des fissures, des déformations et des ruptures. De plus, un choix inadapté de matériaux, comme l'utilisation d'acier à faible résistance ou de ferrures inappropriées, peut affecter la durabilité et la résistance de la structure. Une conception déficiente des détails structurels, tels que des joints de dilatation mal conçus ou un ancrage insuffisant, peut également engendrer des concentrations de contraintes.

Au stade de l'exécution, une fabrication défailante du béton, résultant d'un dosage incorrect des constituants, peut conduire à une porosité accrue, une faible résistance et une durabilité réduite. De même, un placement inapproprié des armatures peut provoquer une distribution inégale des contraintes. Enfin, un séchage trop rapide ou un traitement inadéquat du béton peut induire des fissures et une diminution de la résistance du matériau.

I.2.4.2. Modification des conditions de fonctionnement

Les ouvrages en béton armé sont conçus dans le respect d'une utilisation spécifique et des charges d'exploitation déterminées. Cependant, au fil du temps, les conditions d'exploitation ou d'utilisation peuvent évoluer, ce qui peut entraîner des contraintes supplémentaires et accroître les risques de dégradation.

Voici quelques exemples de modifications des conditions d'exploitation ou d'utilisation :

- **Évolution du trafic routier** : l'augmentation du trafic routier, ainsi que du volume et du poids des véhicules, peut générer des charges plus importantes sur les ponts et viaducs.
- **Changement d'utilisation d'un bâtiment** : La conversion d'un bâtiment résidentiel en bâtiment à usage commercial, par exemple, peut induire des charges d'exploitation plus élevées, nécessitant ainsi le renforcement des planchers et des fondations.
- **Changement de l'environnement** : Les modifications environnementales, telles que l'élévation du niveau de la mer, peuvent engendrer une dégradation accélérée du béton et des armatures, impliquant éventuellement la mise en œuvre de mesures de protection supplémentaires.

I.3. Impact de la dégradation sur les performances mécaniques des ouvrages

La dégradation des ouvrages en béton armé, qu'elle soit d'origine mécanique, physique ou chimique, affecte profondément leurs performances mécaniques, compromettant ainsi leur intégrité et leur capacité à supporter les charges initialement prévues. Cette détérioration se traduit par des conséquences significatives sur les propriétés mécaniques, telles qu'une diminution de la résistance à la compression et à la traction du béton. Elle peut être le résultat de plusieurs mécanismes de dégradation, notamment la carbonatation, l'attaque sulfatique, la réaction alcali-granulats, ainsi que les cycles de gel-dégel et l'érosion, qui contribuent à une perte de matériau et à une augmentation de la porosité. De plus, la corrosion des armatures en acier provoque une réduction de leur section transversale, affaiblissant ainsi leur capacité à résister

aux efforts de traction, ce qui peut également entraîner la fissuration du béton environnant. Par ailleurs, la diminution de l'adhérence entre le béton et les armatures, causée par divers facteurs, compromet le transfert optimal des charges. Cette dégradation progressive entraîne une augmentation de la fissuration et de la déformation au fil du temps, réduisant par conséquent la résistance et la rigidité structurelles. Enfin, la dégradation des structures en béton armé augmente leur vulnérabilité face aux agents agressifs externes, ce qui raccourcit leur durée de vie et met en péril la sécurité des usagers et des infrastructures. Cela conduit souvent à la nécessité de réparations fréquentes ou même d'un remplacement prématuré.

I.4. Importance de techniques de réhabilitation et de renforcement efficaces

Face aux défis engendrés par la dégradation des structures en béton armé, l'importance de techniques de réhabilitation et de renforcement efficaces est primordiale. Ces méthodes jouent un rôle essentiel dans la préservation de la sécurité, de la fonctionnalité et de la durabilité des ouvrages, permettant ainsi de répondre à plusieurs objectifs fondamentaux.

Tout d'abord, la restauration de la résistance et de la rigidité des structures constitue un objectif prioritaire. L'utilisation de matériaux composites tels que les polymères renforcés de fibres (FRP) ou l'ajout d'armatures supplémentaires permet de réparer les éléments structurels affaiblis par la corrosion, la fissuration, ou d'autres formes de dégradation. Ces techniques renforcent la capacité portante des structures et restaurent leurs performances initiales.

Ensuite, la limitation de la propagation des fissures et la prévention de nouveaux dommages sont également des aspects cruciaux. Des techniques telles que l'injection de résine dans les fissures ou le renforcement par collage de matériaux composites contribuent à stabiliser les fissures existantes et à prévenir l'apparition de nouvelles fissures, assurant ainsi une meilleure durabilité structurelle.

Par ailleurs, un autre objectif important est l'amélioration de la durabilité et de la résistance aux agents agressifs. L'application de matériaux composites résistants à la corrosion et aux agents chimiques, tels que les FRP, permet d'augmenter la longévité des structures réhabilitées, notamment dans des environnements marins ou industriels où le béton est particulièrement vulnérable à la dégradation chimique.

Les interventions de réhabilitation et de renforcement visent également à restaurer la capacité portante et la stabilité globale de l'ouvrage, garantissant la sécurité des usagers et la fiabilité de l'infrastructure dans le temps. De plus, elles permettent de maintenir la structure en

bon état d'utilisation, éviter les déformations et limiter les dommages qui pourraient affecter sa fonctionnalité.

Le choix des techniques de réhabilitation et de renforcement dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels figurent le type et la gravité des dommages, les conditions d'exploitation de l'ouvrage, les contraintes budgétaires, ainsi que les exigences esthétiques. Un diagnostic précis est nécessaire pour déterminer la solution la plus adaptée à chaque situation, afin d'optimiser l'efficacité des interventions et de prolonger la durée de vie des structures.

I.5. Techniques traditionnelles de renforcement des ouvrages en béton

Le renforcement des structures en béton armé s'est d'abord développé avec des techniques traditionnelles utilisant des matériaux conventionnels tels que l'acier et le béton. Ces méthodes, éprouvées au fil du temps, permettent d'améliorer la capacité portante et la durabilité des structures, mais elles présentent également des limitations en termes de poids, de coût et de complexité de mise en œuvre. Parmi les techniques traditionnelles de renforcement, on peut citer:

I.5.1. Chemisage en acier et revêtements en béton

Le chemisage, qu'il soit en acier ou en béton, repose sur un principe simple mais efficace : augmenter la section des éléments structurels pour améliorer leur capacité portante et leur durabilité. Ces techniques consistent à envelopper l'élément existant d'une couche supplémentaire de matériau, créant ainsi une structure composite plus résistante.

I.5.1.1. Chemisage en béton armé

Le chemisage en béton armé consiste à appliquer une couche épaisse de béton armé autour d'une colonne pour renforcer sa résistance à la compression, sa ductilité et sa résistance au cisaillement. Ce procédé, illustré dans la Figure I.9, montrant un chemisage en béton d'un poteau en béton armé, est apprécié pour son coût relativement faible et l'absence de besoin en main-d'œuvre spécialisée. Cependant, il présente plusieurs inconvénients, notamment une augmentation significative du poids de la structure, la nécessité de construire un coffrage, et un allongement de la durée des travaux. De plus, une préparation minutieuse de la surface est indispensable. Cela inclut le décaissement du béton existant pour améliorer la transmission des efforts. Une couche primaire de résine est ensuite appliquée sur la surface préparée, suivie de la mise en place des armatures et du coffrage, avant le coulage final du béton.



Figure I.9: Chemisage en béton d'un poteau en béton armé

I.5.1.2. Chemises en acier

Le chemisage en acier représente une méthode de renforcement structurel largement adoptée pour améliorer la résistance à la compression et au cisaillement des éléments en béton armé tels que les colonnes et les poutres. Cette technique, illustrée dans la Figure I.10, montrant un exemple de chemisage par acier, consistant à envelopper l'élément existant avec des plaques ou des profilés en acier, confère à la structure une rigidité et une résistance accrues, en créant une combinaison de matériaux robustes.

Dans le domaine des applications, le chemisage en acier est particulièrement efficace pour renforcer les colonnes, où il augmente la capacité à supporter des charges verticales importantes ou des forces sismiques. De même, il est souvent utilisé pour renforcer les poutres, en améliorant leur résistance au cisaillement, notamment aux appuis et aux zones de concentration des charges. Cette technique peut également être déployée pour réparer des éléments endommagés suite à des incidents tels que des chocs, des explosions ou des incendies, restaurer leur intégrité structurelle et leur capacité portante.

Les avantages du chemisage en acier résident dans sa haute résistance et rigidité, offrant une capacité portante significative aux structures renforcées. De plus, il contribue à la ductilité de la structure, en permettant une déformation contrôlée avant la rupture, notamment dans les zones sujettes aux charges sismiques. Sa rapidité de mise en œuvre est également un atout, réduisant ainsi la durée des travaux sur le chantier. En outre, sa facilité d'inspection permet une maintenance efficace, essentielle pour détecter et traiter rapidement les problèmes de corrosion.



Figure I.10: Chemisage par acier [63]

Cependant, le chemisage en acier présente des inconvénients, notamment sa sensibilité à la corrosion, nécessitant une protection et un entretien réguliers. Son coût élevé peut également limiter son utilisation, en particulier pour les projets à grande échelle. De plus, son application sur des surfaces non planes peut poser des défis, augmentant la complexité et le coût de la mise en œuvre.

I.5.2. Précontrainte externe et post-tension

La précontrainte externe et la post-tension représentent des stratégies de renforcement essentielles qui exploitent les forces de compression pour améliorer les performances des structures en béton armé. Ces techniques impliquent l'application de forces de précontrainte au béton à l'aide de câbles ou de barres en acier à haute résistance, ce qui permet de contrebalancer les tensions générées par les charges et d'augmenter la résistance globale de la structure.

Dans le cadre de la précontrainte externe, des câbles ou des barres précontraints sont positionnés à l'extérieur de l'élément en béton et ancrés à ses extrémités. En tendant ces câbles ou barres, une compression est induite dans le béton, renforçant ainsi sa capacité à supporter des charges importantes, comme le montre la Figure I.11, illustrant l'application de cette technique pour la réparation des ponts à poutres. Quant à la technique de post-tension, des gaines sont intégrées dans le béton lors de sa construction, puis des câbles sont passés à travers ces gaines une fois le béton durci. Ces câbles sont ensuite tendus et ancrés, créant une compression dans le béton qui renforce la structure.



Figure I.11: Application de la précontrainte externe pour réparer les ponts à poutres

Les applications de la précontrainte externe et de la post-tension sont vastes. Elles sont particulièrement efficaces pour renforcer les poutres, les dalles, les ponts et les viaducs, où elles contribuent à améliorer la résistance à la flexion et au cisaillement, ainsi qu'à réduire la fissuration. De plus, ces techniques peuvent être utilisées pour réparer des structures endommagées, en restaurant leur intégrité structurelle et en augmentant leur capacité portante.

I.5.3. Renforcement avec plaques en acier

Le renforcement avec plaques en acier est une méthode traditionnelle largement utilisée pour améliorer la résistance à la flexion et au cisaillement des éléments en béton armé [64]. Cette approche implique l'application de plaques d'acier sur la surface du béton, fournissant ainsi une augmentation significative de la capacité portante de la structure.

Les applications des plaques en acier couvrent un large éventail de besoins structurels. Elles sont principalement utilisées pour le renforcement en flexion des poutres et des dalles [64], ainsi que pour améliorer la résistance au cisaillement des poutres en les plaçant sur les faces latérales. De plus, elles sont efficacement employées dans la réparation des dommages causés par des événements tels que les chocs ou les incendies, restaurant ainsi l'intégrité structurelle des éléments endommagés.

Les avantages de cette méthode incluent la haute résistance et la rigidité de l'acier qui améliorent considérablement la capacité portante de la structure. De plus, les plaques en acier peuvent contribuer à la ductilité de la structure, permettant une déformation contrôlée avant la rupture, un aspect crucial pour la résistance aux séismes. La facilité d'inspection constitue également un avantage majeur, permettant une détection et un traitement rapides des problèmes de corrosion.

Cependant, Ce type de travaux présente une lourdeur de mise en œuvre, nécessite des moyens importants de manutention, très difficile à réaliser pour le cas des surfaces non droites et présente un grand problème de corrosion lorsque la plaque en acier n'est pas bien protégée. De plus, le risque de décollement de la plaque est le problème le plus souvent rencontré.

I.5.4. Renforcement par béton projeté

Largement utilisée dans le domaine de la réhabilitation et du renforcement des structures en béton armé. Cette technique implique la projection à haute pression et vitesse de béton sur la surface du béton existant, ce qui permet de réparer les dommages, d'augmenter l'épaisseur des éléments et d'améliorer la résistance et la durabilité de la structure. Le béton projeté appliqué en couches successives.

Les applications du béton projeté sont variées. Il est couramment utilisé pour la réparation de surfaces endommagées, telles que celles présentant des fissures, des éclats ou des nids d'abeilles, permettant ainsi de restaurer l'intégrité de la surface et de prévenir la pénétration d'agents agressifs. De plus, cette technique permet d'augmenter l'épaisseur des dalles, des poutres et des colonnes, améliorant ainsi leur résistance à différents types de contraintes [65]. Le béton projeté peut également être utilisé pour protéger les armatures en acier contre la corrosion et pour améliorer la résistance au feu des structures.

Il existe deux principaux types de béton projeté : la voie sèche et la voie humide. Dans la voie sèche, le mélange sec de ciment, de granulats et d'adjuvants est transporté par voie pneumatique jusqu'à la buse de projection, où l'eau est ajoutée pour former le béton. En revanche, dans la voie humide, le béton est préparé avec de l'eau avant d'être pompé vers la buse de projection.

Les avantages du renforcement par béton projeté résident dans sa polyvalence, sa rapidité de mise en œuvre, son adaptabilité aux formes complexes et sa durabilité. Cette méthode offre une solution efficace pour divers besoins de réhabilitation et de renforcement des structures en béton armé. Cependant, elle présente également des inconvénients, notamment des exigences strictes en termes de qualité du support, de contrôle de la qualité et de rebondissement du matériau projeté.

I.5.5. Traitement des fissures et des zones endommagées

Le traitement des fissures et des zones endommagées est une étape critique dans la réhabilitation des structures en béton armé. Ces défauts peuvent compromettre l'intégrité

structurelle, l'étanchéité et la durabilité des ouvrages, nécessitant ainsi des interventions spécifiques pour restaurer leurs performances et prévenir la propagation des dommages.

Il existe différents types de fissures et de dommages, résultant de diverses causes telles que le retrait du béton, la surcharge, les mouvements de fondations ou la corrosion des armatures. Les fissures peuvent varier en taille, profondeur et nature, tandis que les écaillages, éclatements et nids d'abeilles représentent d'autres formes de détérioration superficielle.

Pour traiter ces problèmes, plusieurs techniques sont disponibles. L'injection de résine ou de mortier est souvent utilisée pour remplir les fissures, rétablir la continuité du béton et améliorer l'étanchéité. Le pontage et l'agrafage renforcent les fissures et limitent leur propagation.

Quant aux zones endommagées, le béton projeté est souvent employé pour restaurer les écaillages, éclatements et nids d'abeilles, en réparant la surface du béton et en augmentant son épaisseur. Le mortier de réparation reconstruit les zones endommagées pour restaurer la géométrie de la structure. Dans les cas graves, le remplacement du béton dégradé par un nouveau est nécessaire.

1.6. Techniques de renforcement innovantes avec des composites FRP

Les matériaux composites, allient légèreté et performances mécaniques remarquables [66-68], sont largement employés depuis de nombreuses années dans les domaines industriels de pointe tels que l'aéronautique ou l'automobile [66, 67, 69]. Grâce à des efforts de recherche soutenus, tant par les entreprises que par les gouvernements, les composites ont connu des avancées significatives dans leurs matériaux constitutifs et leurs processus de fabrication. Aujourd'hui, ces matériaux sont capables de répondre à des normes de qualité et de durabilité très strictes, ce qui les place en concurrence directe avec des matériaux traditionnels comme l'acier. Cette évolution a ouvert de nouvelles perspectives d'applications pour les composites, y compris dans le domaine de la construction et du renforcement des structures en béton armé [70].

L'émergence des composites à base de polymères renforcés de fibres (FRP) ouvre de nouvelles perspectives pour la réhabilitation et le renforcement des structures en béton armé [71]. Comparés aux méthodes traditionnelles, les FRP offrent plusieurs avantages significatifs.

Tout d'abord, les FRP ont un rapport résistance/poids élevé, ce qui les rend plus légers que l'acier [71], réduisant ainsi les charges sur la structure et facilitant leur manipulation et leur mise en œuvre. De plus, leur résistance naturelle à la corrosion élimine le besoin de traitements de surface et d'entretien réguliers, ce qui les rend idéaux pour les environnements agressifs [72, 73].

La facilité d'application des FRP sur des surfaces de formes complexes et leur polyvalence, grâce à différents types de fibres et de matrices, en font des solutions adaptées à diverses applications et exigences de performance [74]. De plus, leur capacité à supporter des charges cycliques sans se dégrader significativement en fait des matériaux idéaux pour les structures soumises à des charges dynamiques.

Les applications de renforcement avec des FRP sont variées. Ils peuvent être utilisés pour renforcer la flexion des poutres et des dalles [74], améliorer la résistance au cisaillement des poutres [75], confiner les colonnes pour augmenter leur résistance à la compression et à la ductilité, et réparer les dalles endommagées en restaurant leur capacité portante et limitant la fissuration.

Cependant, l'application des FRP n'est pas sans défis. Le coût initial peut être plus élevé que celui des matériaux traditionnels, bien que leur durabilité et leur faible entretien puissent compenser cet investissement sur le long terme. De plus, des problèmes tels que le délaminage aux extrémités des plaques de FRP et leur sensibilité à la température doivent être pris en compte lors de leur utilisation [74, 76, 77]. Malgré les progrès réalisés dans l'élaboration de normes et de codes de conception pour les FRP, il reste encore des variations entre les différentes régions et organisations.

I.6.1. Avantages des composites FRP par rapport aux méthodes traditionnelles

Les composites FRP, avec leurs propriétés remarquables, ouvrent de nouvelles perspectives dans le domaine du renforcement des structures en béton armé. Leurs avantages indéniables en termes de performance, de durabilité et de facilité d'application les placent au premier plan des matériaux innovants pour la réhabilitation des infrastructures vieillissantes ou endommagées.

Voici quelques avantages clés des composites FRP :

- **Rapport résistance/poids élevé** : Constitue un avantage majeur. Les FRP sont significativement plus légers que l'acier, ce qui réduit les charges sur la structure et facilite leur manipulation et leur mise en œuvre [78]. Typiquement, les composites FRP possèdent une densité d'environ 1,6 à 2 g/cm³, tandis que celle de l'acier est d'environ 7,85 g/cm³, soit près de 4 à 5 fois plus légère. En termes de résistance à la traction, les FRP peuvent atteindre 1 200 MPa, comparés aux 250-400 MPa de l'acier doux [79], offrant ainsi une résistance spécifique (résistance divisée par densité) environ 3 à 4 fois supérieure à celle de l'acier. Cet aspect est

particulièrement avantageux pour les ponts et les structures existantes où l'ajout de poids peut être problématique, évitant ainsi la nécessité de renforcements de la fondation.

- **Résistance exceptionnelle à la corrosion** : Les FRP sont naturellement résistants à la corrosion [73, 80, 81], ce qui élimine le besoin de traitements de surface et d'entretien réguliers, contrairement aux plaques d'acier. Cette propriété est essentielle pour les structures exposées à des environnements agressifs, tels que les ponts en bord de mer, les ouvrages hydrauliques et les structures industrielles [82]. La résistance à la corrosion des FRP contribue à une durée de vie accrue des structures et réduit les coûts d'entretien à long terme.
- **Facilité d'application** : Les FRP sont disponibles sous forme de feuilles flexibles ou de plaques préfabriquées, ce qui les rend faciles à appliquer sur des surfaces de formes complexes [74, 83, 84], contrairement aux plaques d'acier rigides qui peuvent nécessiter des découpes et des ajustements complexes. Les composites FRP s'adaptent aisément à la géométrie de la structure à renforcer.
- **Polyvalence** : La variété des types de fibres (carbone, verre, aramide) et de matrices (époxy, polyester) permet de créer des FRP aux propriétés spécifiques, adaptées à une multitude d'applications et d'exigences de performance [85, 86]. Cette polyvalence offre aux ingénieurs une grande flexibilité de conception pour répondre aux besoins spécifiques de chaque projet.
- **Haute résistance à la fatigue** : Haute résistance à la fatigue en fait des matériaux idéaux pour les structures soumises à des charges cycliques [87, 88], ce qui les rend idéaux pour les structures soumises à des charges dynamiques, telles que les ponts routiers et ferroviaires, les bâtiments exposés aux vibrations ou les structures offshore.

1.6.2. Différents systèmes et applications de renforcement FRP

Les systèmes de renforcement par FRP offrent une polyvalence remarquable, adaptée à une variété d'applications et d'exigences de performance. Voici un aperçu des principaux systèmes et des applications spécifiques pour chaque besoin :

1. Renforcement en flexion : Ce système consiste à coller des lamelles ou des feuilles de FRP sur la face tendue des poutres et des dalles pour améliorer leur résistance à la flexion [74]. Les fibres sont généralement orientées longitudinalement pour optimiser la résistance dans la direction de la flexion. Cette technique est idéale pour restaurer la capacité portante des éléments présentant des fissures ou une résistance insuffisante.

2. Renforcement en cisaillement : Pour améliorer la résistance au cisaillement, des lamelles ou des feuilles de FRP sont collées sur les faces latérales des poutres [75, 87]. Les fibres peuvent être orientées verticalement, horizontalement ou en diagonale selon les efforts tranchants et les mécanismes de rupture. Cela permet de limiter la propagation des fissures diagonales et d'améliorer la capacité de charge latérale des éléments.

3. Confinement des colonnes : Envelopper les colonnes avec des matériaux FRP permet d'augmenter leur résistance à la compression et leur ductilité [89, 90]. Ce confinement limite l'expansion latérale du béton sous compression, renforçant ainsi sa résistance et sa capacité à se déformer avant la rupture. Cette technique est cruciale pour améliorer la résistance sismique des structures.

4. Réparation des dalles : Les dalles endommagées, présentant des fissures ou des zones de béton dégradé, peuvent être réparées en collant des lamelles ou des feuilles de FRP sur leur face inférieure [91, 92]. Cela permet de restaurer la capacité portante de la dalle et de prévenir la propagation des fissures, assurant ainsi la sécurité structurelle de l'ouvrage.

En termes d'applications spécifiques, les FRP sont largement utilisés dans divers secteurs:

- **Ponts et viaducs [74] :** Renforcement des tabliers, des poutres, des piles et des culées pour améliorer leur résistance aux charges de trafic, aux forces sismiques et à la fatigue.
- **Bâtiments :** Renforcement des poutres, des colonnes et des murs pour la réhabilitation de structures anciennes ou endommagées par des séismes, des incendies ou des explosions.
- **Ouvrages hydrauliques :** Renforcement des barrages, des réservoirs et des canalisations pour résister aux forces hydrostatiques, aux variations de température et aux agressions chimiques.
- **Structures offshore :** Renforcement des plateformes offshore et des structures marines pour résister à la corrosion et à la fatigue induites par l'environnement marin.

La Figure I.12 illustre les principales applications du renforcement par composites collés sur ouvrages de génie civil.

La diversité des applications des FRP témoigne de leur adaptabilité et de leur capacité à répondre aux besoins spécifiques de chaque projet de renforcement structurel. En combinant différentes techniques et matériaux FRP, il est possible de concevoir des solutions sur mesure pour assurer la durabilité et la performance des structures en béton armé.

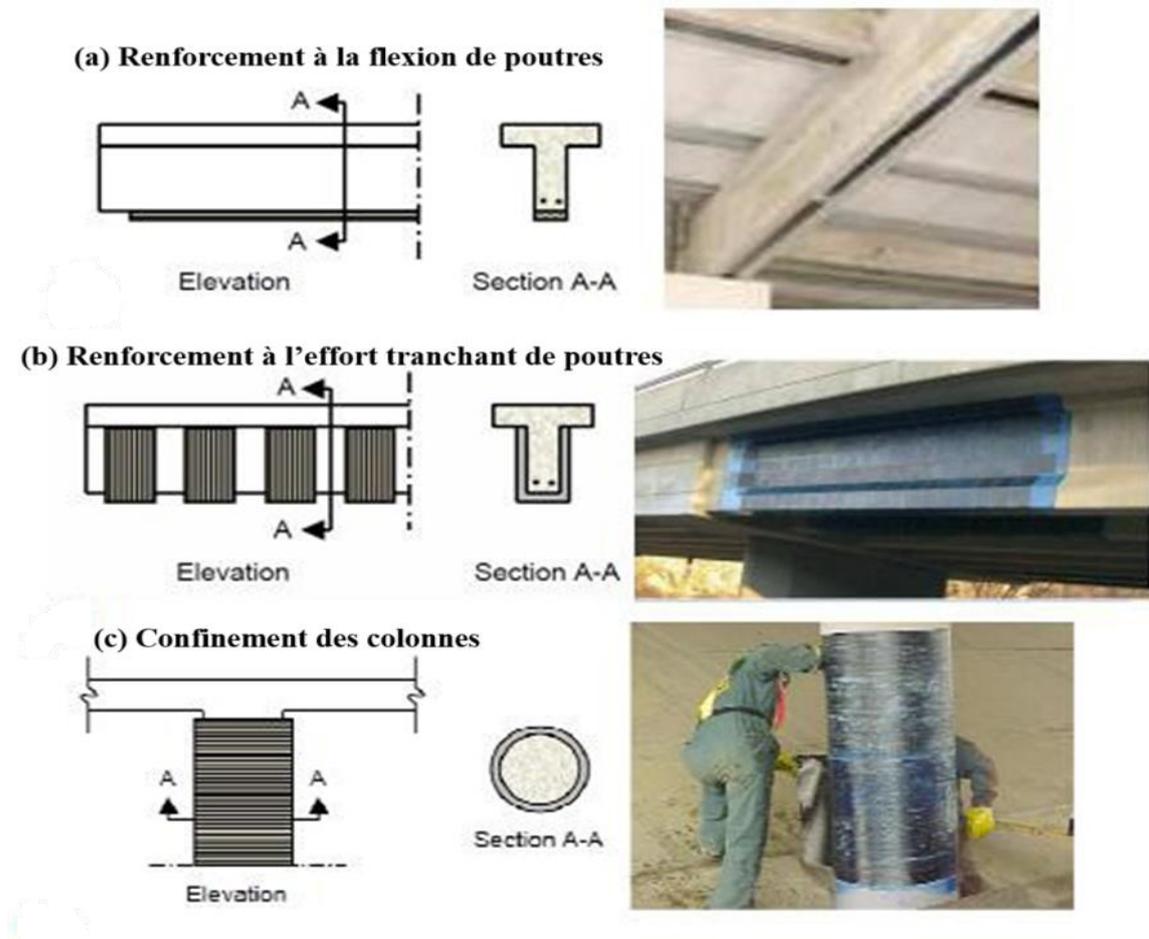


Figure I.12: Description des principales applications du renforcement par composites collés sur ouvrages de génie civil [93]

I.6.3. Défis et considérations pour l'application des FRP

Malgré les nombreux avantages des composites FRP, leur utilisation en vue d'un renforcement des structures en béton armé peut présenter certains défis. Voici une analyse des principaux obstacles et des considérations importantes pour une application optimale :

- 1. Coût initial :** Les composites FRP peuvent être plus coûteux que les matériaux traditionnels comme l'acier et le béton. Cependant, il est important de considérer les avantages à long terme, tels que la durabilité, le faible entretien et la longévité des structures renforcées, qui peuvent compenser ces coûts initiaux plus élevés.
- 2. Délaminage aux extrémités des plaques :** Les contraintes interfaciales élevées aux extrémités des plaques de FRP peuvent entraîner un décollement prématuré, compromettant ainsi l'efficacité du renforcement [74, 78].
- 3. Sensibilité à la température :** Certains types de composites FRP peuvent être sensibles aux températures élevées, ce qui peut entraîner leur dégradation [73]. Il est donc essentiel de choisir

des matériaux adaptés aux conditions environnementales et de prendre en compte les variations de température lors de la conception du renforcement.

4. Manque de normes et de codes de conception uniformes : Bien qu'il existe des progrès dans l'élaboration de normes et de recommandations pour les composites FRP, il peut encore exister des variations entre les régions et les organisations. Il est donc important de se référer aux normes les plus récentes et de s'assurer que les matériaux et les techniques de mise en œuvre sont conformes aux exigences locales.

En plus de ces défis techniques, il est crucial de prendre en compte d'autres considérations telles que la préparation adéquate de la surface du béton, le choix approprié de l'adhésif, et la qualité de la mise en œuvre des renforcements en FRP. En surmontant ces obstacles avec expertise et rigueur, les ingénieurs peuvent exploiter pleinement le potentiel des composites FRP pour créer des infrastructures plus sûres, plus durables et plus performantes.

I.7. Importance des contraintes interfaciales dans les structures renforcées par FRP

L'efficacité du renforcement des structures en béton armé à l'aide de composites FRP repose en grande partie sur la qualité de l'interface entre le béton et le FRP. Les contraintes interfaciales dans les structures renforcées par des composites FRP jouent un rôle crucial dans leur performance et leur durabilité.

Dans ce qui suit nous allons citer l'impact des contraintes interfaciales et des facteurs qui les influencent :

1. Délaminage : Les contraintes interfaciales élevées, surtout aux extrémités des plaques de FRP, peuvent causer un décollement prématuré du matériau, compromettant ainsi l'efficacité du renforcement et pouvant mener à une rupture fragile.

2. Transfert de charge : Un transfert de charge adéquat entre le béton et le FRP est essentiel pour l'efficacité du renforcement. Des contraintes interfaciales mal réparties ou insuffisantes peuvent limiter ce transfert de charge et réduire la capacité portante de la structure.

3. Durabilité : Des contraintes interfaciales élevées peuvent causer des microfissures et des dommages à l'interface, favorisant ainsi la pénétration d'agents agressifs et accélérant la dégradation de la structure.

Les facteurs influençant les contraintes interfaciales sont :

1. Propriétés des matériaux : La rigidité relative du béton et du FRP, ainsi que les propriétés de l'adhésif, influent sur la répartition des contraintes à l'interface.

2. Géométrie de la structure : La forme, les dimensions de l'élément renforcé et la disposition du FRP peuvent affecter la concentration des contraintes aux extrémités des plaques.

3. Conditions de chargement : Les charges appliquées à la structure, qu'elles soient statiques ou dynamiques, ont un impact sur les contraintes interfaciales.

4. Effets environnementaux : Les variations de température et d'humidité peuvent également entraîner des contraintes supplémentaires à l'interface.

Pour garantir la performance et la durabilité des structures renforcées par FRP, des méthodes d'analyse et de prédiction précises pour les contraintes interfaciales sont essentielles. Ces méthodes doivent prendre en compte tous les facteurs mentionnés précédemment et permettre aux ingénieurs de concevoir des renforcements efficaces et durables.

I.8. Matériaux composites

I.8.1. Introduction aux matériaux composites

Les matériaux composites, également désignés sous le terme de matériaux à matrice polymère (PMC), représentent une catégorie de matériaux d'ingénierie avancés qui ont profondément transformé divers secteurs, parmi lesquels le génie civil. Les matériaux composites, grâce à leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, occupent une place de plus en plus importante dans le domaine du génie civil, offrant des solutions innovantes pour la réparation et le renforcement des structures en béton armé.

Un matériau composite se définit comme un matériau hétérogène constitué de deux ou plusieurs composants distincts, combinés à une échelle macroscopique afin d'obtenir des propriétés supérieures à celles des composants individuels. Ces composants comprennent généralement un renfort, constitué de fibres (carbone, verre, aramide, etc.), ainsi qu'une matrice, qui représente la phase continue du composite, souvent une résine polymère (époxy, vinylester, polyester, etc.). Cette combinaison permet d'assurer une tenue mécanique optimale grâce au renfort, tandis que la matrice lie les renforts entre eux, les protège des dommages environnementaux et assure le transfert de charge. La combinaison de ces composants, avec des proportions et des architectures spécifiques, permet de créer des matériaux aux propriétés sur mesure, adaptées à diverses applications.

L'élaboration des composites est étroitement liée aux besoins spécifiques de l'utilisateur, prenant en compte des facteurs tels que la nature, la texture et la forme du renfort, la nature de la résine et des additifs, la qualité de l'interface renfort-matrice, la géométrie de la pièce à réaliser, ainsi que le procédé de mise en œuvre utilisé. De plus, les matériaux composites peuvent être classés en différentes catégories en fonction de la nature de la matrice et des renforts, avec des applications allant des températures ambiantes à des températures élevées, dépassant parfois 1000°.

Les matériaux composites jouent un rôle de plus en plus crucial dans le génie civil, offrant des solutions innovantes pour la réparation et le renforcement des structures existantes, ainsi que des possibilités de conception avancées pour les nouvelles constructions. Leur utilisation a connu une expansion remarquable en raison de leur rapport résistance/poids élevé, de leur résistance à la corrosion, et de leur facilité d'application. Ces caractéristiques, combinées à leur durabilité accrue et à leur potentiel esthétique, font des composites des choix attractifs pour les ingénieurs, contribuant ainsi à la création de structures plus performantes, plus légères et plus respectueuses de l'environnement.

I.8.2. Types de renforts composites

Les renforts (fibres) sont les constituants principaux des matériaux composites, souvent sous forme de fibres, jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de la résistance mécanique et de la rigidité des matériaux composites. Son rôle essentiel est la résistance à la grande partie des charges sollicitant le composite. Leur structure filamenteuse, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue, confère au matériau un effet directif. La nature des fibres influence grandement les propriétés des composites [94], notamment en génie civil, où l'on trouve des fibres telles que le carbone, offrant un haut module élastique et une résistance importante à la fatigue, le verre, souvent utilisé pour renforcer les bétons en raison de ses résistances moyennes, et l'aramide, reconnu pour sa haute résistance à la traction, utilisé notamment dans les câbles de hautes performances. Le choix du renfort dépend donc des exigences mécaniques, de la résistance à la corrosion, de la tenue en température et du coût, nécessitant une compréhension approfondie des propriétés de chaque type de fibre pour une sélection judicieuse dans chaque application.

I.8.2.1. Fibre de carbone

La fibre de carbone, est un matériau de renforcement hautement performant largement utilisé dans les composites pour le génie civil en raison de ses propriétés exceptionnelles. Avec une résistance à la traction élevée, un module d'élasticité supérieur et une légèreté remarquable,

elle est privilégiée pour les applications exigeantes. Sa résistance exceptionnelle à la traction lui permet de supporter des charges importantes sans déformation excessive, tandis que son module d'élasticité élevé la rend rigide et stable dimensionnellement. Sa légèreté facilite la manipulation et la mise en œuvre des composites, tandis que sa résistance à la fatigue et à la corrosion en font un choix idéal pour les structures soumises à des charges dynamiques et exposées à des environnements corrosifs. Les fibres de carbone sont fabriquées à partir de précurseurs polymères comme le polyacrylonitrile, soumis à un processus de carbonisation et de graphitisation à haute température pour obtenir leurs propriétés mécaniques exceptionnelles. Leur utilisation dans le génie civil s'étend au renforcement de ponts, de bâtiments, de structures de grande portée et de structures offshore, offrant ainsi des solutions innovantes pour des constructions plus performantes, légères et durables.

I.8.2.2. Fibre de verre

La fibre de verre, un filament extrêmement fin composé de silice et d'additifs (alumine, alcalins, alcalino-terreux), se décline en quatre qualités en fonction de ses applications :

- Verre E : usage général, bonnes propriétés électriques
- Verre D : hautes propriétés diélectrique (pour la fabrication de circuits imprimés)
- Verre C : résistance chimique élevée
- Verre R ou S : haute résistance mécanique (haute performance)

Le Tableau I.1 présente les propriétés des fibres de verre de type E et S.

Elle constitue le principal renfort utilisé dans plus de 95% des matériaux composites, offrant un excellent rapport de performance mécanique par rapport à son coût de production. Les fibres de verre sont fabriquées par étirage de verre fondu à travers une filière, produisant des filaments d'un diamètre généralement compris entre 5 et 25mm à une vitesse élevée. Malgré leur fragilité et leur rupture brutale sans déformation plastique, les fibres de verre demeurent les plus utilisées dans les composites à Grande Diffusion. Elles présentent un module de Young faible et une densité plus élevée que d'autres fibres, mais restent une option privilégiée pour de nombreuses applications en raison de leur faible coût de production. Les fibres de verre sont utilisées dans divers secteurs tels que le génie civil, l'industrie des bateaux et des automobiles, offrant des modules d'élasticité de 50 à 85 GPa avec un allongement ultime de 2 à 5 % selon la qualité. Bien qu'elles puissent présenter des problèmes de relaxation et être sensibles à l'humidité, elles peuvent être protégées en choisissant la bonne matrice.

Tableau I.1: Propriétés des fibres de verre type E et S [95]

Propriétés	Verre type E	Verre type S
Densité (g/cm ³)	2.45	2.49
Résistance à la traction (MPa)	3 448	4 585
Module d'élasticité (GPa)	72.4	85.5
Diamètre possible mm	3-20	8-13
Coefficient de dilatation thermique 10 ⁶ /°C	5.0	2.9

I.8.2.3. Fibre aramide

Les fibres aramides, souvent commercialisées sous la marque Kevlar, sont largement utilisées pour leur résistance et leur légèreté. Leur comportement est similaire à celui des métaux, élastiques sous de faibles charges et plastiques sous de fortes contraintes. Elles offrent un compromis intéressant entre les fibres de carbone et celles à base de verre. Malgré leur bonne résistance au feu, leur adhérence avec les résines peut entraîner une faible résistance à la compression et à la flexion lors du renforcement des composites. Les applications industrielles des fibres aramides incluent les produits de protection comme les gilets pare-balles et les casques, ainsi que des articles de sport tels que les raquettes de tennis et les pièces de skis. Selon leur procédé de fabrication, on distingue deux types de fibres : les fibres à "base module" avec un module d'élasticité de 70 GPa, et les fibres à "haut module" avec un module d'élasticité de 130 GPa, utilisées principalement comme renforts dans les composites.

I.8.2.4. Fibres céramiques réfractaires

Les fibres céramiques réfractaires (FCR) sont des matériaux de renforcement spécialisés qui excellent dans les applications à haute température en raison de leur résistance exceptionnelle à la chaleur et aux produits chimiques. Composées de matériaux céramiques comme l'alumine et la silice, ces fibres conservent leurs propriétés mécaniques même à des températures extrêmes, ce qui les rend indispensables dans des environnements où les matériaux traditionnels ne suffisent pas.

Les propriétés des fibres céramiques réfractaires comprennent leur résistance à la chaleur extrême, pouvant atteindre jusqu'à 1300 °C ou plus selon les compositions, sans subir de dégradation significative de leurs propriétés mécaniques. Elles sont également résistantes aux produits chimiques et présentent une faible conductivité thermique, ce qui les rend efficaces pour l'isolation thermique dans les environnements industriels. De plus, leur faible densité contribue à réduire le poids des structures et des équipements.

La fabrication des fibres céramiques réfractaires implique généralement la fusion à haute température de matériaux céramiques, suivie d'un processus d'étirage ou de soufflage pour former des fibres fines.

En génie civil, les FCR sont utilisées dans diverses applications, notamment pour la protection contre le feu des structures en acier et en béton, l'isolation thermique des bâtiments et des équipements à haute température, ainsi que pour le renforcement des matériaux à haute température comme les bétons réfractaires.

I.8.3. Les matrices dans les composites

La matrice joue un rôle crucial dans les matériaux composites en liant les renforts ensemble de manière compacte et en leur donnant la forme finale. Elle assure également le transfert des charges entre les fibres et les protège de l'environnement. Les performances générales du composite dépendent largement de la nature de la matrice, en particulier pour ce qui est de sa durabilité à long terme.

Il existe différentes catégories de matrices, notamment organiques, minérales, céramiques et métalliques. Le choix d'une matrice pour une application spécifique repose sur plusieurs critères :

1. **Adhésion et compatibilité avec les renforts** : La matrice doit être compatible avec les fibres de renforcement et présenter une bonne adhésion pour assurer une liaison efficace.
2. **Propriétés mécaniques et résistance à la fatigue** : La matrice doit avoir des propriétés mécaniques appropriées pour répondre aux exigences de l'application, notamment en termes de résistance et de durabilité face à la fatigue.
3. **Absorption d'eau** : La capacité de la matrice à absorber l'eau peut être un facteur critique, surtout dans des environnements où l'exposition à l'humidité est élevée.

Le choix de la matrice dépend des besoins spécifiques du projet, tels que les propriétés mécaniques requises, la résistance à la corrosion, la tolérance aux températures élevées, la facilité de manipulation et le budget disponible. Chaque type de résine présente ses avantages et inconvénients, et il est essentiel de sélectionner la matrice appropriée pour garantir la performance et la durabilité du matériau composite dans son application finale.

I.8.4. Architecture des matériaux composites

L'architecture des matériaux composites, qui consiste en la disposition des renforts et de la matrice, joue un rôle essentiel dans leurs propriétés mécaniques et leur comportement.

Différentes architectures sont utilisées pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application, en optimisant la résistance, la rigidité et la durabilité des composites.

Les principales architectures des matériaux composites sont les suivantes :

I.8.4.1. Monocouche

Une monocouche est constituée d'une seule couche de fibres, généralement unidirectionnelles, imprégnées dans une matrice. Elle offre une résistance maximale dans la direction des fibres, mais sa résistance transversale est généralement plus faible. Les monocouches servent souvent de base pour la construction de stratifiés.

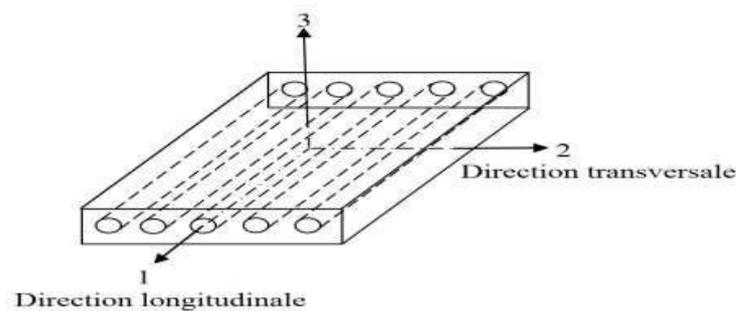


Figure I.13: Construction d'un Monocouche

I.8.4.2. Stratifié

Un stratifié est composé de plusieurs couches de monocouches superposées, avec des orientations de fibres différentes, comme montré dans la Figure I.14. Cette architecture permet d'obtenir des propriétés mécaniques multidirectionnelles, en adaptant la résistance et la rigidité du composite aux sollicitations spécifiques de la structure. Les stratifiés sont largement utilisés dans le génie civil pour renforcer les poutres, les colonnes et les dalles.

- Stratifié unidirectionnel : Toutes les couches ont la même orientation de fibres, offrant une résistance maximale dans une seule direction.
- Stratifié multidirectionnel : Les couches ont des orientations de fibres différentes, offrant une résistance et une rigidité dans plusieurs directions.
- Stratifié symétrique : Les couches sont disposées symétriquement par rapport au plan médian du stratifié, évitant ainsi les déformations de torsion.
- Stratifié équilibré : Le nombre de couches orientées dans une direction est égal au nombre de couches orientées dans la direction opposée, assurant un comportement équilibré du composite.

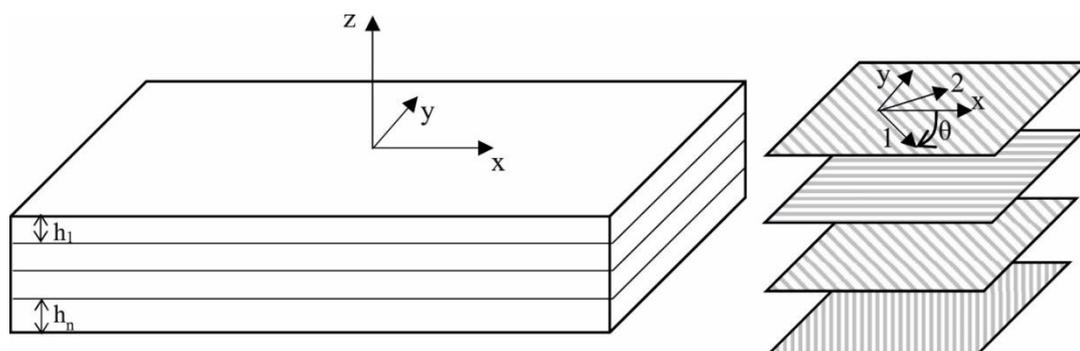


Figure I.14: Construction d'un stratifié [96]

I.8.4.3. Structures sandwich :

Une structure sandwich est constituée de deux peaux minces et rigides, souvent en stratifié, séparées par une âme épaisse et légère, comme de la mousse ou un nid d'abeilles. Cette architecture offre un excellent rapport rigidité/poids et est utilisée pour construire des panneaux de façade, des ponts et des structures légères.

Le choix de l'architecture dépend des exigences spécifiques de la structure et des sollicitations auxquelles elle est soumise. Concevoir une architecture optimale permet de maximiser les performances du matériau composite et d'assurer la durabilité de la structure renforcée.

I.8.5. Propriétés mécaniques des composites

Les caractéristiques mécaniques des matériaux composites présentent une grande diversité, influencée par plusieurs facteurs. Ces facteurs incluent la nature des fibres utilisées, comprenant leur type, leur quantité et leur orientation [97], ainsi que la matrice employée et le rapport volume-fibre. De plus, les dimensions du composite lui-même jouent un rôle significatif dans ses propriétés mécaniques. En général, les composites renforcés par des fibres de carbone exhibent une résistance et une rigidité supérieures par rapport à ceux renforcés par des fibres de verre ou d'aramide [98]. Cette observation est corroborée par le Tableau I.2 qui répertorie les propriétés mécaniques typiques des composites utilisés dans les applications de génie civil, confirmant que les fibres de carbone surpassent celles de verre et d'aramide en termes de performances mécaniques.

Tableau I.2: Propriétés mécaniques caractéristiques des composite [99]

Composite unidirectionnel	Contenu en fibres (%)	Densité (kg/m ³)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
Fibres de verre / polyester (GFRP laminé)	50-80	1600-2000	20-55	400-1800
Carbone / époxy (CFRP laminé)	65-75	1600-1900	120-250	1200-2250
Aramide / époxy (FRP laminé)	60-70	1050-1250	40-125	1000-1800

I.9. Applications des matériaux composites en génie civil

Le génie civil est actuellement peu consommateur de matériaux composites, comparativement à d'autres secteurs tels que l'industrie de l'automobile ou celle de l'aérospatiale. Cependant, il propose des solutions de renforcement et de réparation efficaces et durables pour diverses structures, des ponts aux bâtiments, en passant par les ouvrages hydrauliques et les installations marines. Dans le contexte des ponts et des viaducs, cruciaux pour notre réseau de transport, ces matériaux offrent plusieurs avantages, notamment la capacité à augmenter la charge supportable, à réduire les flèches et à améliorer la durabilité, tout en réduisant le poids structurel. Les exemples d'applications comprennent le renforcement des poutres avec des lamelles de FRP et la réparation des fissures sur les tabliers de ponts, comme montré dans la Figure I.15, qui illustre l'application de bandes de renfort sur la face inférieure d'une dalle et sur une poutre.



Figure I.15: Application de bandes de renfort sur la face inférieure d'une dalle et sur une poutre [93]

En ce qui concerne les bâtiments endommagés, les matériaux composites sont utilisés pour réparer les fissures, renforcer les colonnes et améliorer la résistance des murs, assurant ainsi la restauration et la pérennité des structures affectées. Par ailleurs, leur utilisation s'étend aux

travaux maritimes pour la construction de structures offshore, aux ouvrages hydrauliques pour renforcer les barrages et les canalisations, ainsi qu'aux tunnels pour améliorer leur résistance et leur étanchéité. Un exemple de cette application est montré dans la Figure I.16, où l'on voit l'application de renfort sur la face d'un poteau. Globalement, les matériaux composites représentent des solutions polyvalentes et indispensables pour le génie civil, garantissant la sécurité, la durabilité et la fonctionnalité des infrastructures.



Figure I.16: Application de renfort sur la face d'un poteau [100]

I.10. Conclusion

Les pathologies affectant les ouvrages en béton armé constituent un défi majeur pour la durabilité et la sécurité des infrastructures. Ce chapitre a souligné l'importance de comprendre les causes de la dégradation, qu'elles soient d'origine mécanique, physique ou chimique, afin de mieux anticiper et remédier à ces problématiques. La surveillance régulière, la qualité des matériaux, ainsi que l'adoption de techniques de construction appropriées sont des facteurs essentiels pour prévenir la détérioration. En cas de dégradation avancée, la réhabilitation et le renforcement des structures deviennent indispensables pour restaurer leurs propriétés mécaniques et garantir leur longévité.

Les techniques de réhabilitation traditionnelles, telles que le chemisage en béton armé ou en acier, ont démontré leur efficacité, mais présentent certaines limitations, notamment en termes de surcharge, de coût et de vulnérabilité à la corrosion. En revanche, les matériaux composites, comme les polymères renforcés de fibres (FRP), se distinguent par leur légèreté, leur haute résistance mécanique, leur durabilité accrue et leur facilité de mise en œuvre, offrant une alternative prometteuse pour le renforcement et la réparation des structures. Bien que l'utilisation de ces matériaux puisse présenter certains défis, notamment en raison du coût initial et du risque

de délaminage, ces obstacles peuvent être surmontés grâce à une expertise spécialisée et à des techniques d'application appropriées.

L'avenir de la réhabilitation des structures en béton armé repose sur l'évolution continue des matériaux composites et des méthodes de mise en œuvre. Avec l'amélioration constante des procédés et le développement de nouveaux matériaux, il devient possible de concevoir des infrastructures plus durables, plus sûres et mieux adaptées aux exigences contemporaines. Ces avancées contribuent non seulement à la préservation du patrimoine bâti, mais également à la sécurité et au bien-être des usagers.

Dans le chapitre qui suit, nous allons exposer l'application de l'une des méthodes de l'intelligence artificielles comme outil de prédiction en ingénierie.

**Chapitre II : Méthode des réseaux de
neurones artificiels et son intégration
dans le domaine de l'ingénierie**

II.1. Introduction

L'intelligence artificielle (IA) constitue un domaine en pleine expansion, dont l'objectif est de concevoir des machines capables d'exécuter des tâches habituellement associées à l'intelligence humaine. Elle s'appuie sur des algorithmes et des modèles mathématiques, permettant aux ordinateurs d'apprendre à partir de données, de raisonner, de prendre des décisions et d'interagir avec le monde réel. L'idée de développer des machines intelligentes suscite l'intérêt de l'humanité depuis des siècles. Cependant, ce n'est qu'au milieu du XXe siècle, avec l'avènement de l'informatique, que l'IA a véritablement émergé en tant que domaine de recherche autonome. Le terme "intelligence artificielle" a été formulé en 1956, marquant ainsi le début d'une nouvelle ère scientifique.

Aujourd'hui, l'intelligence artificielle (IA) est omniprésente dans nos vies, avec des applications allant des assistants virtuels sur les smartphones aux systèmes de recommandation sur les plateformes de streaming, en passant par les véhicules autonomes et les diagnostics médicaux assistés par ordinateur. L'IA transforme nos modes de vie et de travail grâce à diverses approches visant un objectif commun : créer des systèmes intelligents. Parmi ces approches, l'apprentissage automatique (Machine Learning) permet aux machines d'apprendre à partir de données sans nécessiter de programmation explicite, identifiant ainsi des modèles et des relations pour formuler des prédictions ou prendre des décisions. L'apprentissage profond (Deep Learning) emploie des réseaux de neurones artificiels profonds pour apprendre des représentations complexes des données, ayant conduit à des avancées spectaculaires dans des domaines tels que la reconnaissance d'images et le traitement du langage naturel. Les systèmes experts, quant à eux, imitent le raisonnement d'un expert humain dans un domaine spécifique en s'appuyant sur une base de connaissances et des règles d'inférence pour résoudre des problèmes complexes.

L'intelligence artificielle (IA) présente un potentiel considérable pour résoudre des problématiques complexes et améliorer la qualité de nos vies. Toutefois, son développement soulève également des interrogations éthiques et sociétales significatives. Parmi celles-ci figurent l'impact sur l'emploi, la protection de la vie privée et la responsabilité associée aux décisions prises par les machines. En perpétuelle évolution, l'IA offre un avenir prometteur, où les avancées technologiques et les recherches en cours ouvrent la voie à des applications encore plus novatrices et transformatrices.

II.2. Historique et définition de la méthode des réseaux de neurones artificiels

Un réseau de neurones artificiels (RNA) constitue un système informatique destiné à reproduire le fonctionnement du cerveau humain. Ce système est constitué de multiples unités de calcul interconnectées, désignées sous le terme de neurones artificiels, qui sont organisées en couches et s'inspirent des neurones biologiques. Chaque neurone d'une couche est connecté aux neurones des couches adjacentes par des connexions pondérées par des coefficients numériques, appelés poids synaptiques, qui déterminent l'influence d'un neurone sur un autre et modulent, par conséquent, le flux d'information à travers le réseau. Le processus de traitement de l'information au sein d'un RNA comprend la réception de données en entrée, leur propagation à travers les couches de neurones, et la production d'une sortie. Les RNA possèdent la capacité d'apprendre à partir de données, en ajustant leurs poids synaptiques afin d'optimiser leur performance sur une tâche spécifique, à travers des algorithmes qui modifient les poids en fonction des erreurs identifiées lors de l'exécution de la tâche.

L'évolution des réseaux de neurones artificiels (RNAs) est jalonnée de progrès notables. En 1943, Warren McCulloch et Walter Pitts introduisent le premier modèle mathématique du neurone artificiel, capable d'exécuter des fonctions logiques simples [101], posant ainsi les fondements du connexionnisme. En 1958, Frank Rosenblatt élabore le perceptron, un algorithme d'apprentissage destiné à un réseau de neurones monocouche, capable de classer des données linéairement séparables, bien que ses limitations soient rapidement mises en évidence. En 1969, Marvin Minsky et Seymour Papert publient l'ouvrage "Perceptrons," qui met en exergue les contraintes des réseaux de neurones monocouches, notamment leur incapacité à résoudre des problèmes non linéairement séparables. Cet ouvrage marque le début d'une période de stagnation dans la recherche sur les RNAs, souvent désignée sous le terme "l'hiver de l'IA."

Cependant, au cours des années 1980, l'algorithme de rétropropagation du gradient est développé, permettant l'apprentissage de réseaux de neurones multicouches [102] et ravivant l'intérêt pour les réseaux de neurones artificiels (RNAs). Dans les décennies suivantes, notamment dans les années 1990 et 2000, de nouvelles architectures de RNAs, telles que les réseaux convolutifs (CNNs) [103] et les réseaux récurrents (RNNs) [104], émergent, offrant la possibilité de traiter des problèmes plus complexes tels que la reconnaissance d'images et la modélisation de séquences temporelles. Depuis 2010, le Deep Learning [105], approche fondée sur des réseaux de neurones profonds dotés de nombreuses couches cachées, connaît un essor considérable, stimulé par l'augmentation de la puissance de calcul et la disponibilité de grandes

quantités de données. Cette révolution impacte des domaines variés, notamment la reconnaissance d'images, la traduction automatique et la robotique.

Les RNAs sont aujourd'hui des outils incontournables de l'intelligence artificielle, utilisés dans une multitude d'applications. Leur capacité à apprendre à partir de données, à s'adapter à de nouvelles situations et à gérer des relations non linéaires en fait des systèmes précieux pour la résolution de problèmes complexes dans divers domaines de l'ingénierie.

II.2.1. Définition

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) constituent des modèles computationnels qui s'inspirent du fonctionnement du système nerveux humain, en particulier du cerveau [106]. Destinés à reproduire la capacité d'apprentissage du cerveau à partir de données et à réaliser des tâches complexes, les RNAs se composent de "neurones" artificiels interconnectés et organisés en couches. Chaque neurone effectue une opération mathématique élémentaire sur ses entrées pondérées, Chaque neurone effectue une opération mathématique simple sur ses entrées pondérées, et la combinaison de ces opérations non linéaires, introduites par des fonctions d'activation, permet au réseau d'apprendre des relations complexes entre les données. Cela est illustré dans la Figure II.1, qui présente un schéma d'un neurone.

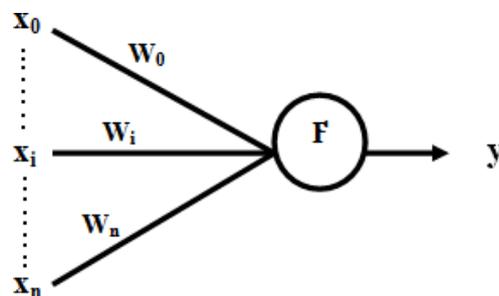


Figure II.1: Schéma d'un neurone

La capacité des réseaux de neurones artificiels (RNAs) à apprendre à partir de données leur permet d'exécuter une vaste gamme de tâches, incluant la classification, la prédiction et l'optimisation. Cette polyvalence trouve des applications dans divers domaines. En synthèse, un RNA constitue un modèle mathématique conçu pour simuler le fonctionnement du cerveau, facilitant ainsi l'apprentissage à partir de données et l'accomplissement de tâches complexes. Ces réseaux sont largement employés dans des domaines tels que la reconnaissance d'images, le traitement du langage naturel, la prédiction et le contrôle.

II.2.2. Modèles de réseaux de neurones

De nombreux modèles de réseaux de neurones, tels que les réseaux de neurones récurrents (RNN) et les réseaux antagonistes génératifs (GAN), illustrent la diversité des approches disponibles dans ce domaine. Chacun de ces modèles offre des applications spécifiques et contribue de manière significative à l'avancement des technologies basées sur l'intelligence artificielle.

II.2.2.1. Réseaux de neurones récurrents (RNN)

Les réseaux de neurones récurrents (RNN), une classe spécifique de réseaux neuronaux artificiels, se distinguent par leur capacité à traiter des données séquentielles en conservant une "mémoire" interne des informations précédentes. Contrairement aux réseaux de neurones classiques, les RNN possèdent des connexions récurrentes qui permettent de rétroalimenter les informations à chaque étape du traitement, les rendant particulièrement adaptés à des tâches où l'ordre et le contexte des données sont essentiels. En génie civil, les RNN trouvent des applications prometteuses, notamment dans la prévision des séries temporelles comme la modélisation des flux de trafic [107], la gestion des ressources en eau [108, 109], ou encore la surveillance des infrastructures. Par exemple, les RNN peuvent être utilisés pour analyser des données provenant de capteurs installés sur des ponts ou des bâtiments, permettant ainsi de détecter des changements subtils dans les vibrations ou les déformations, et d'anticiper des défaillances potentielles. Cependant, l'entraînement des RNN peut être complexe en raison des problèmes de gradient, notamment le phénomène de gradient qui disparaît ou explose, ce qui peut limiter leur capacité à gérer des séquences longues. Des variantes telles que les LSTM (Long Short-Term Memory) et GRU (Gated Recurrent Unit) ont été développées pour atténuer ces limitations et améliorer la performance des RNN dans le cadre de scénarios à long terme.

II.2.2.2. Réseaux antagonistes génératifs (GANs)

Les réseaux antagonistes génératifs (GANs), introduits par Goodfellow, Pouget-Abadie [110], constituent une avancée significative dans le domaine de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique. Basés sur un modèle de compétition entre deux réseaux neuronaux artificiels, le générateur et le discriminateur, les GANs permettent de générer des données synthétiques indiscernables des données réelles. Le générateur crée des données à partir d'un bruit aléatoire, tandis que le discriminateur s'efforce de distinguer les données réelles des données artificielles, créant ainsi un processus d'apprentissage compétitif. Ce modèle est particulièrement pertinent pour l'ingénierie, notamment en génie civil, où les GANs offrent des applications

prometteuses dans la modélisation de structures complexes, la simulation de matériaux, ou la génération de données pour l'entraînement d'algorithmes lorsque les données réelles sont insuffisantes. Par exemple, les GANs peuvent être utilisés pour simuler des scénarios de dégradations structurelles afin de tester des modèles de prédiction ou de diagnostic de défaillances. Cependant, malgré leur potentiel, les GANs présentent des défis importants dans leur formation, notamment pour maintenir un équilibre stable entre le générateur et le discriminateur afin d'éviter des problèmes tels que le mode collapse. Il est donc nécessaire de poursuivre les recherches pour adapter ces réseaux aux contraintes spécifiques de l'ingénierie civile et exploiter pleinement leur potentiel dans la réhabilitation et le renforcement des infrastructures.

II.3. Principes fondamentaux des réseaux de neurones artificiels

Pour comprendre le fonctionnement des RNAs, il est essentiel de saisir les principes qui les régissent, depuis le modèle du neurone artificiel jusqu'à l'organisation des réseaux et les algorithmes d'apprentissage.

II.3.1. Inspiration biologique et modèle du neurone

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) s'inspirent profondément du fonctionnement du cerveau humain, un système biologique complexe capable de traiter l'information de manière parallèle et distribuée. Au centre de ce système se trouve le neurone biologique, une cellule spécialisée qui reçoit, intègre et transmet l'information sous forme de signaux électrochimiques. L'analyse du neurone biologique a permis d'identifier les éléments clés qui ont inspiré la création du neurone artificiel, l'unité de base des RNAs, comme illustré dans la Figure II.2.

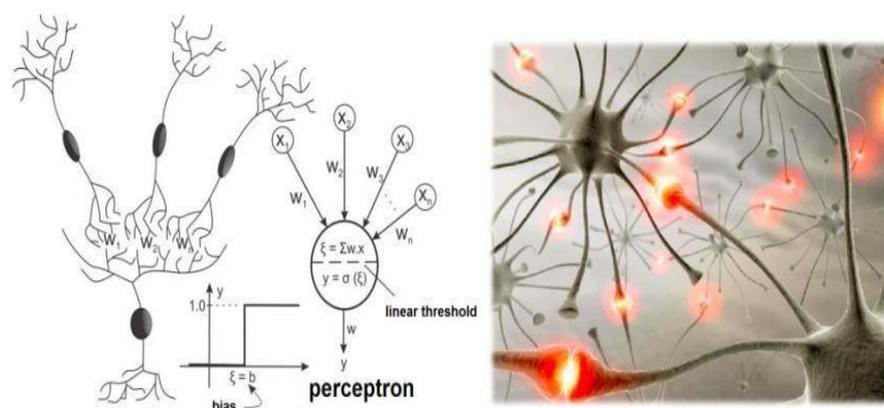


Figure II.2: Comparaison entre le neurone biologique et le neurone artificiel [111]

II.3.2. Structure et fonctionnement du neurone artificiel

L'architecture est un concept fondamental qui joue un rôle déterminant dans la classification des réseaux de neurones artificiels (RNAs). Dans la littérature, le terme structure est souvent utilisé comme synonyme d'architecture. Chaque architecture possède une organisation propre, adaptée à des applications spécifiques.

La structure et d'un neurone artificiel, est des simplifications mathématiques du neurone biologique. Un neurone artificiel se compose de trois éléments principaux : les entrées, les poids synaptiques, et le biais. Les entrées (x_1, x_2, \dots, x_n) représentent les signaux numériques reçus, tandis que les poids synaptiques (w_1, w_2, \dots, w_n) déterminent l'influence de chaque entrée, ajustés durant l'apprentissage. Le biais (b) permet de décaler le seuil d'activation. Le fonctionnement du neurone se déroule en trois étapes : la sommation des entrées pondérées et du biais, l'application d'une fonction d'activation (f), et la production de la sortie. La sommation est représentée par les équations :

$$net = \sum_i w_i * x_i + b = w_1 * x_1 + w_2 * x_2 + \dots + w_n * x_n + b \quad \text{II.1}$$

$$z = f(net) \quad \text{II.2}$$

Et la fonction d'activation décide de l'activation du neurone. Enfin, la sortie, qui peut être transmise à d'autres neurones ou servir de sortie finale. Ce processus itératif à travers les multiples couches d'un réseau permet d'effectuer des calculs complexes et d'apprendre à partir des données.

II.3.2.1. Entrées, poids synaptiques et biais

Les entrées, les poids synaptiques et le biais sont les trois éléments fondamentaux qui constituent la structure d'un neurone artificiel, définissant comment l'information est reçue, pondérée et combinée pour produire une activation.

1. Entrées (x_1, x_2, \dots, x_n)

Les entrées représentent les données brutes que le neurone artificiel doit traiter, provenant de diverses sources telles que les sorties des neurones de la couche précédente dans un réseau multicouche, les pixels d'une image ou les valeurs d'un capteur. Ces signaux numériques varient en fonction de la nature de l'information.

2. Poids synaptiques (w_1, w_2, \dots, w_n)

Chaque entrée est associée à un poids synaptique, un coefficient numérique qui détermine son influence sur l'activation du neurone. Les poids synaptiques, simulant l'efficacité des

synapses biologiques, peuvent être positifs (favorisant l'activation) ou négatifs (inhibant l'activation). Ces poids sont ajustés pendant l'apprentissage pour optimiser la performance du réseau sur une tâche donnée.

3. Biais (b)

Le biais est un paramètre indépendant des entrées, permettant de décaler le seuil d'activation du neurone. En ajustant le biais, on peut modifier la sensibilité du neurone aux entrées, facilitant ou rendant plus difficile son activation. Le biais permet également l'activation du neurone même si la somme pondérée des entrées est nulle.

II.3.2.2. Fonctions d'activation : Sigmoides, ReLU, Tanh

La fonction d'activation, élément clé du neurone artificiel, joue un rôle fondamental dans le fonctionnement des réseaux de neurones en introduisant une non-linéarité cruciale. Son rôle comprend plusieurs aspects essentiels : premièrement, elle effectue une transformation non-linéaire de la somme pondérée des entrées et du biais, permettant au réseau de modéliser des relations complexes entre les entrées et les sorties, ce qui serait impossible avec une simple combinaison linéaire. Deuxièmement, elle simule le seuil d'activation du neurone biologique, déterminant si le neurone est activé. Enfin, le choix de la fonction d'activation impacte significativement la capacité du réseau à apprendre et à généraliser, certaines fonctions étant mieux adaptées aux problèmes de classification et d'autres aux problèmes de régression.

Types de fonctions d'activation (Figure II.3) :

1. Sigmoides :

La fonction sigmoïde est en forme de "S", comprimant la somme pondérée des entrées dans un intervalle de 0 à 1.

$$f(z) = \frac{1}{1 + \exp(-z)} \quad \text{II.3}$$

2. ReLU (Unité Linéaire Rectifiée) :

La fonction ReLU est linéaire pour les valeurs positives et nulle pour les valeurs négatives.

$$f(z) = \max(0, z) \quad \text{II.4}$$

3. Tanh (Tangente Hyperbolique) :

La fonction Tanh, similaire à la sigmoïde, comprime la somme pondérée des entrées dans un intervalle de -1 à 1.

$$f(z) = \frac{\exp(z) - \exp(-z)}{\exp(z) + \exp(-z)}$$

II.5

Le choix de la fonction d'activation dépend de la nature du problème à résoudre et de l'architecture du réseau de neurones.

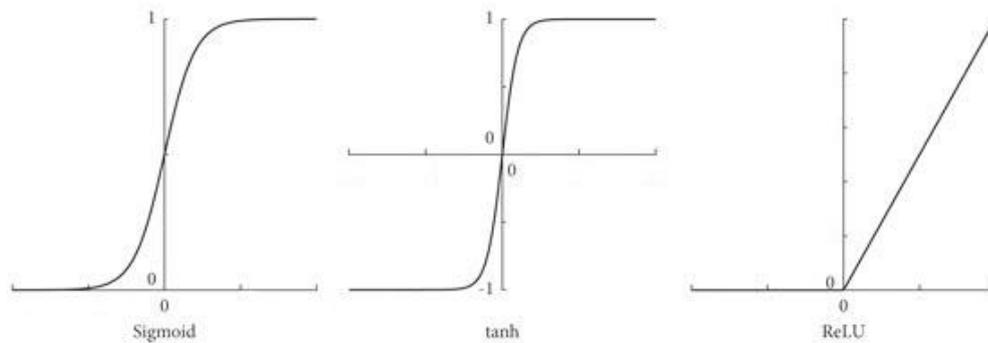


Figure II.3 : Les types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel [112]

II.3.3. Architecture des réseaux de neurones

L'architecture d'un réseau de neurones, définie par l'arrangement et la connexion des neurones artificiels, est cruciale pour la capacité du réseau à apprendre et à réaliser des tâches spécifiques. On distingue trois grandes catégories d'architectures : monocouche, multicouche et récurrente. La définition de la taille du réseau et de sa structure sont deux étapes complexes de la construction d'un RNA [106].

II.3.3.1. Réseaux monocouches

Les réseaux de neurones monocouches représentent la forme la plus simple de l'architecture RNA, composés d'une seule couche de neurones qui relie directement les entrées aux sorties sans passer par des couches cachées (Figure II.4). Chaque neurone de la couche reçoit toutes les entrées, pondérées par les poids synaptiques, et produit une sortie après application de la fonction d'activation. Bien que les réseaux monocouches aient été parmi les premiers algorithmes d'apprentissage pour les RNAs et soient capables de classifier des données linéairement séparables, leur capacité à apprendre des relations complexes est limitée [113].

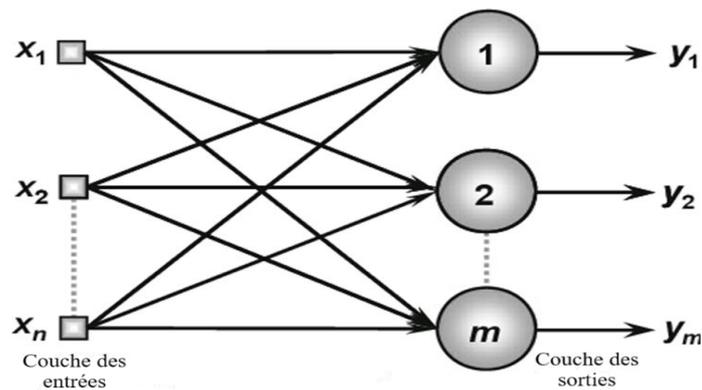


Figure II.4: Architecture du réseau de neurone monocouche

II.3.3.2. Réseaux multicouches

Les réseaux de neurones multicouches (MLPs), représentent une avancée significative par rapport aux réseaux monocouches. Ces réseaux comprennent plusieurs couches de neurones (Figure II.5), incluant une ou plusieurs couches cachées entre la couche d'entrée et la couche de sortie, ce qui leur confère une capacité d'apprentissage accrue. Chaque neurone d'une couche cachée reçoit les sorties des neurones de la couche précédente, pondère ces entrées en fonction de ses poids synaptiques, et produit une sortie après application de la fonction d'activation, qui est ensuite transmise aux neurones de la couche suivante.

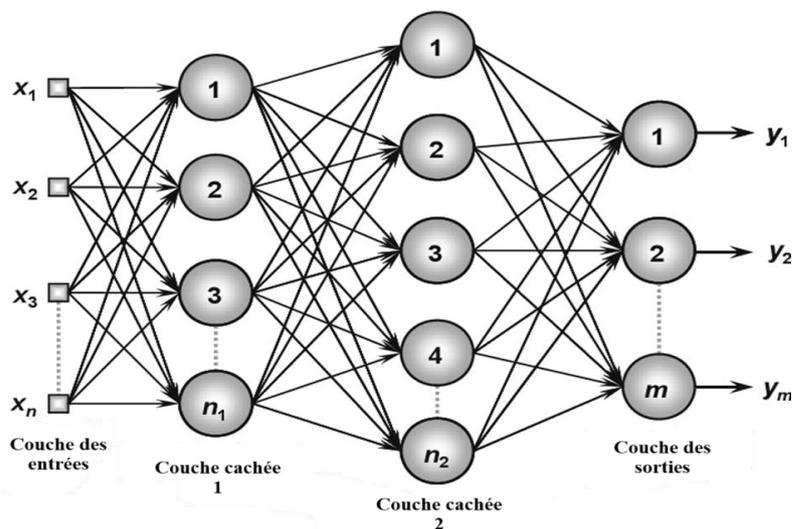


Figure II.5: Architecture des réseaux de neurones multicouches (MLPs)

Ce processus permet aux réseaux multicouches de capturer des relations non linéaires complexes dans les données, contrairement aux réseaux monocouches. L'apprentissage dans les réseaux multicouches se fait principalement via l'algorithme de rétropropagation du gradient [113], qui minimise l'erreur en ajustant les poids synaptiques. Les réseaux multicouches sont largement utilisés pour des applications telles que la classification, la régression et

l'approximation de fonctions. Cependant, le nombre de couches cachées et de neurones doit être ajusté pour éviter le surapprentissage. Les réseaux multicouches sont essentiels au Deep Learning.

II.4. Apprentissage et Optimisation dans les RNAs

L'un des aspects les plus fascinants des réseaux de neurones artificiels (RNAs) est leur capacité à apprendre à partir de données. Contrairement aux programmes informatiques traditionnels, qui sont explicitement programmés pour réaliser une tâche spécifique, les RNAs apprennent à partir d'exemples, ajustant progressivement leurs paramètres internes (poids synaptiques, biais) pour améliorer leur performance. Ce processus d'apprentissage est dynamique et itératif, permettant de modifier les paramètres d'un réseau en réaction aux entrées [114]. Le type d'apprentissage est déterminé par la manière dont les changements de paramètres surviennent. Ce mécanisme d'ajustement, central au fonctionnement des RNAs, leur confère la capacité de résoudre des problèmes complexes en adaptant leurs structures internes à partir des données d'entraînement.

II.4.1. Types et processus d'apprentissage

L'apprentissage est le processus fondamental permettant aux réseaux de neurones artificiels (RNAs) de s'adapter aux données et d'accomplir des tâches complexes. On distingue deux grandes catégories d'apprentissage : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé, chacun possédant ses propres principes, objectifs et applications spécifiques.

II.4.1.1. Apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé (Figure II.6) est une méthode essentielle en intelligence artificielle permettant aux réseaux de neurones artificiels (RNAs) de s'adapter à partir d'un ensemble de données étiquetées. Dans ce type d'apprentissage, on cherche à imposer au réseau un fonctionnement donné en forçant les sorties des réseaux à prendre des valeurs bien déterminées, choisies par l'opérateur. Ce processus repose sur quatre principes clés : l'utilisation de données étiquetées où chaque entrée correspond à une sortie souhaitée, la minimisation d'une fonction de coût qui mesure l'erreur entre les prédictions du modèle et les sorties souhaitées, l'optimisation des poids synaptiques via des algorithmes comme la rétropropagation du gradient, et la capacité de généralisation pour prédire correctement de nouvelles données. Par exemple, pour classer des images de fruits, un RNA est entraîné sur un ensemble de données étiquetées de

pommes, bananes et oranges. Le réseau apprend à reconnaître les caractéristiques distinctives de chaque fruit, permettant de classer correctement de nouvelles images non vues auparavant.

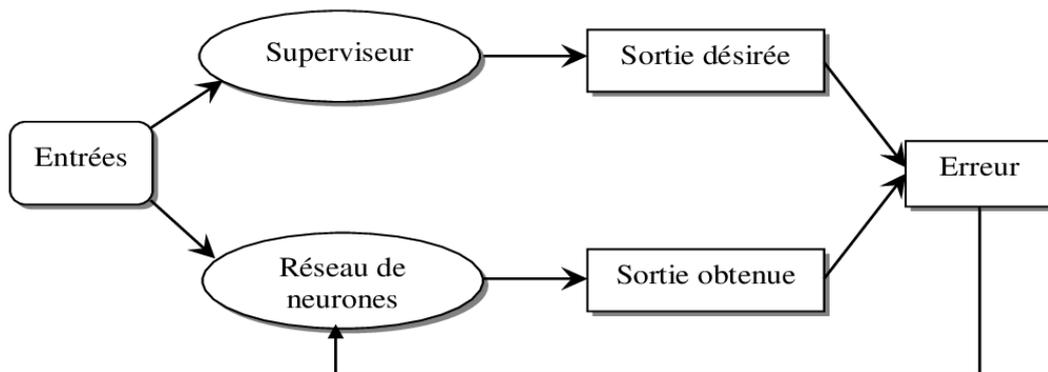


Figure II.6: Apprentissage supervisé [115]

II.4.1.2. Apprentissage non-supervisé

Dans l'apprentissage non supervisé, illustré par la Figure II.7, aucune information préalable sur le comportement attendu n'est disponible, ce qui signifie que le réseau doit apprendre de manière autonome sans intervention externe. Dans ce contexte, un environnement fournit des stimuli auxquels le réseau réagit, ajustant ses paramètres jusqu'à atteindre une stabilisation. Ce type d'apprentissage repose sur des probabilités et vise à découvrir des structures, des motifs et des relations cachées dans les données sans connaissance préalable des sorties attendues. L'entrée est présentée au réseau, qui évolue librement jusqu'à se stabiliser.

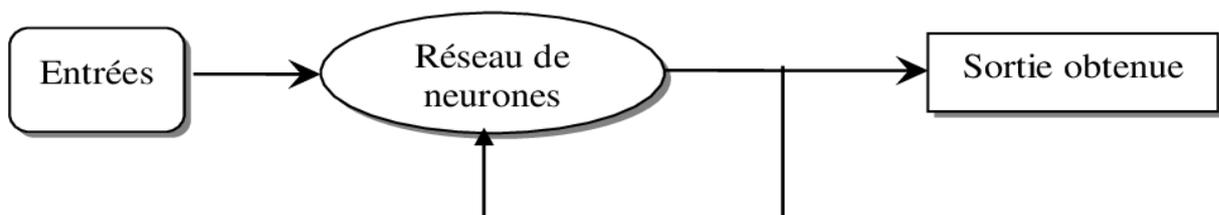


Figure II.7: Apprentissage non-supervisé [115]

II.4.2. Algorithmes d'apprentissage et optimisation

Les algorithmes d'apprentissage sont essentiels pour l'adaptation des poids synaptiques dans les réseaux de neurones artificiels (RNAs), permettant aux réseaux d'apprendre à partir des données d'entraînement en minimisant une fonction de coût qui mesure l'erreur entre la sortie du réseau et la sortie souhaitée. L'algorithme d'apprentissage le plus répandu est la rétropropagation de l'erreur, publié par Rumelhart, Hinton [102]. Cet algorithme ajuste les poids du réseau à chaque présentation d'un exemple, de manière à minimiser l'erreur entre la sortie désirée et la réponse obtenue du réseau. Voici le fonctionnement de la rétropropagation du gradient :

1. Propagation avant : Le réseau reçoit une entrée et propage l'information à travers ses couches pour calculer une sortie prédite.
2. Calcul de l'erreur : La fonction d'évaluation est utilisée pour calculer l'erreur entre la sortie prédite et la sortie souhaitée.
3. Rétropropagation du gradient : L'erreur est propagée en sens inverse à travers les couches du réseau, et le gradient de la fonction de coût est calculé pour chaque poids synaptique.
4. Mise à jour des poids : Les poids synaptiques sont ajustés en les déplaçant dans la direction opposée au gradient, proportionnellement au taux d'apprentissage.

Ces étapes permettent au réseau de minimiser l'erreur et d'améliorer progressivement ses performances pour réaliser des tâches spécifiques.

II.4.3. Processus d'apprentissage

L'apprentissage d'un réseau de neurones artificiels (RNA) est un processus itératif visant à ajuster les poids synaptiques pour minimiser l'erreur entre la sortie du réseau et la sortie souhaitée. Ce processus comprend trois étapes principales :

a) Collecte et préparation des données : La première étape consiste à rassembler et à préparer les données d'entraînement, qui sont cruciales pour la performance du réseau.

- **Collecte des données :** Les données doivent être représentatives du problème et contenir suffisamment d'exemples significatifs.
- **Nettoyage des données :** Les données brutes sont nettoyées pour éliminer les erreurs, les valeurs manquantes et les anomalies.
- **Prétraitement des données :** Les données sont normalisées et transformées pour correspondre au format requis par le réseau, incluant la conversion des données catégorielles et l'extraction de caractéristiques.
- **Division des données :** Les données sont divisées en ensembles d'entraînement, de validation et de test. L'ensemble d'entraînement sert à ajuster les poids, l'ensemble de validation à évaluer la performance pendant l'entraînement, et l'ensemble de test à évaluer la performance finale.

b) Choix du modèle et de ses paramètres : La deuxième étape consiste à sélectionner l'architecture du réseau et à définir les hyperparamètres de l'algorithme d'apprentissage.

- **Architecture du réseau :** Le choix dépend de la nature du problème et de la complexité des données (réseaux monocouches, multicouches ou récurrents).

- **Paramètres** : Les paramètres tels que le taux d'apprentissage, le nombre d'époques et la taille des mini-lots sont définis pour contrôler la vitesse et la précision de l'apprentissage, et doivent être soigneusement ajustés.
- **c) Entraînement et évaluation du modèle** : La troisième étape implique l'entraînement du réseau sur les données d'entraînement et l'évaluation de sa performance.
- **Entraînement** : Le réseau est entraîné en ajustant les poids pour minimiser la fonction de coût, utilisant des algorithmes comme la rétropropagation du gradient.
- **Évaluation** : La performance est évaluée sur l'ensemble de validation pendant l'entraînement et sur l'ensemble de test après l'entraînement, en utilisant des métriques telles que la précision etc.
- **Ajustement des paramètres** : Si la performance n'est pas satisfaisante, les paramètres peuvent être ajustés et le réseau réentraîné.

Ce processus permet aux réseaux de neurones de s'adapter efficacement aux données et de réaliser des tâches complexes avec une performance optimale.

II.4.4. Prétraitement des données et normalisation

Le prétraitement des données et la normalisation sont des étapes essentielles dans la mise en œuvre des réseaux de neurones artificiels (RNAs) et d'autres méthodes d'apprentissage automatique, car elles influencent directement la performance des modèles. Le prétraitement vise à améliorer la qualité des données en traitant les valeurs manquantes, en réduisant le bruit, en corrigeant les erreurs et en sélectionnant les variables pertinentes. Ces opérations permettent non seulement d'obtenir des données plus fiables, mais aussi de garantir une meilleure généralisation des modèles dans des applications réelles. Par exemple, dans le contexte du génie civil, les données provenant de capteurs installés sur des infrastructures comme les ponts ou les bâtiments peuvent être incomplètes ou bruitées. Le prétraitement permet de préparer ces données pour une analyse plus précise et robuste.

II.5. Evaluation des performances et validation des modèles

L'évaluation des performances et la validation des modèles sont des étapes cruciales dans le développement et l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNAs). Elles permettent de quantifier la qualité du modèle, de s'assurer qu'il est capable de généraliser à de nouvelles données, et de choisir le modèle le plus performant parmi plusieurs candidats. Le processus d'évaluation implique l'utilisation de métriques de performance appropriées et une validation

rigoureuse à l'aide d'ensembles de données distincts. Cette approche garantit que le modèle ne se contente pas de mémoriser les données d'entraînement mais qu'il apprend des représentations généralisables utiles pour des prédictions sur des données nouvelles et non vues. Une validation efficace et une évaluation minutieuse aident à identifier les modèles surappris et à affiner les paramètres, contribuant ainsi à la robustesse et à la fiabilité des solutions de machine learning développées.

II.5.1. Métriques d'évaluation des erreurs (MSE, RMSE, MAPE)

Les métriques d'évaluation des erreurs sont essentielles pour calculer l'erreur entre la sortie prédite par le modèle et la sortie réelle, permettant ainsi de mesurer la précision du modèle et d'identifier les domaines où des améliorations sont nécessaires. Ces métriques fournissent des indicateurs numériques pour évaluer la performance des réseaux de neurones artificiels (RNAs) et comparer différents modèles.

Voici trois métriques couramment utilisées pour évaluer l'erreur des RNAs :

1. **MSE (Mean Squared Error)** : Le MSE calcule la moyenne des carrés des erreurs entre les valeurs prédites et les valeurs réelles. Elle est sensible aux valeurs aberrantes.

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{réelle,i} - Y_{sortie,i})^2 \quad \text{II.6}$$

2. **RMSE (Root Mean Squared Error)** : Le RMSE est la racine carrée du MSE. Elle est plus interprétable que le MSE car elle est exprimée dans les mêmes unités que la variable cible.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}} \quad \text{II.7}$$

3. **MAPE (Mean Absolute Percentage Error)** : Le MAPE calcule la moyenne des pourcentages d'erreur absolue entre les valeurs prédites et les valeurs réelles. Elle est utile pour comparer la performance de modèles sur des ensembles de données avec des échelles différentes.

$$\text{MAPE} = (1/n) * \sum(|y_i - \hat{y}_i| / |y_i|) * 100\% \quad \text{II.8}$$

II.5.2. Coefficient de corrélation de Pearson (R)

Le coefficient de corrélation de Pearson (R) est une métrique statistique qui quantifie la force et la direction de la relation linéaire entre deux variables. Il est utilisé pour évaluer la performance des modèles de régression, en mesurant la corrélation entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles. Un R élevé (proche de 1) signifie que le modèle prédictif a une forte relation linéaire avec les données réelles, ce qui indique une meilleure performance.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N \left((Y_{réelle,i} - \overline{Y_{réelle}})(Y_{sortie,i} - \overline{Y_{sortie}}) \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \left((Y_{réelle,i} - \overline{Y_{réelle}})^2 (Y_{sortie,i} - \overline{Y_{sortie}})^2 \right)}} \quad \text{II.9}$$

II.5.3. Techniques de validation des modèles

La validation des modèles est une étape cruciale dans le développement et l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNAs). Elle permet de s'assurer que le modèle appris est capable de généraliser à de nouvelles données, c'est-à-dire qu'il peut prédire correctement la sortie pour des entrées qu'il n'a jamais vues auparavant. Sans validation, le risque de surapprentissage est élevé, c'est-à-dire que le modèle peut apprendre à des données d'entraînement sans être capable de généraliser à de nouvelles données. Voici quelques techniques couramment utilisées :

a) Validation croisée (Cross-validation)

La validation croisée est une technique qui consiste à diviser les données d'entraînement en plusieurs sous-ensembles (folds). Le modèle est ensuite entraîné sur un sous-ensemble et évalué sur les autres sous-ensembles. Ce processus est répété pour chaque sous-ensemble, et la performance moyenne du modèle sur tous les sous-ensembles est utilisée pour estimer sa capacité de généralisation. Cette méthode permet de maximiser l'utilisation des données disponibles et de fournir une évaluation plus robuste de la performance du modèle.

b) Ensemble de validation

Les données sont divisées en trois ensembles distincts : un ensemble d'entraînement pour ajuster les poids synaptiques, un ensemble de validation pour ajuster les paramètres et éviter le surapprentissage, et un ensemble de test pour évaluer la performance finale du modèle. Cette approche permet de s'assurer que le modèle n'est pas trop ajusté aux données d'entraînement et qu'il peut généraliser à de nouvelles données.

II.6. Avantages et Limitations de RNA

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) ont révolutionné de nombreux domaines de l'ingénierie grâce à leur capacité d'apprentissage, d'adaptation et de résolution de problèmes complexes. Cependant, comme tout outil, ils présentent des avantages et des limitations qu'il est important de comprendre pour les utiliser efficacement.

II.6.1. Avantages des RNAs

a) Non-linéarité :

Les RNAs sont capables de modéliser des relations non linéaires complexes entre les entrées et les sorties. Contrairement aux modèles linéaires, qui sont limités à des relations simples et proportionnelles, les RNAs peuvent capturer des interactions et des dépendances plus complexes, ce qui les rend plus adaptés à la modélisation de systèmes réels, où les relations entre les variables sont rarement linéaires.

b) Adaptabilité

Grâce à leur capacité d'apprentissage, les RNAs peuvent s'adapter à de nouvelles situations et à de nouvelles données. Ils peuvent être réentraînés avec de nouvelles données pour améliorer leur performance ou pour s'adapter à des changements dans l'environnement ou les conditions d'opération. Cette adaptabilité est un atout majeur pour les applications d'ingénierie, où les systèmes évoluent souvent au cours du temps.

c) Capacité d'apprentissage :

Les RNAs peuvent apprendre à partir de données et améliorer leurs performances au fil du temps, ce qui les rend adaptés à une large gamme de tâches, y compris celles pour lesquelles il est difficile de concevoir des algorithmes explicites.

II.6.2. Limitations des RNAs

d) Opacité et "boîte noire" :

Les RNAs sont souvent considérés comme des "boîtes noires" car il est difficile d'interpréter les relations qu'ils apprennent. Cette opacité pose des problèmes dans des applications où la transparence et l'explicabilité sont essentielles, comme le diagnostic médical ou le contrôle de systèmes autonomes.

e) Risque de surapprentissage :

Les RNAs peuvent mémoriser les données d'entraînement sans généraliser à de nouvelles données, un phénomène appelé surapprentissage. Cela se produit souvent si le réseau est trop complexe ou si l'entraînement est trop long. Utiliser des techniques de validation aide à éviter ce problème.

f) Choix d'architecture et paramètres :

La performance des RNAs dépend fortement de leur architecture et des paramètres de l'algorithme d'apprentissage. Trouver les paramètres optimaux est souvent empirique et nécessite de nombreuses expérimentations, ce qui peut être difficile et chronophage.

g) Coût de calcul et besoin en données :

L'apprentissage des RNAs, surtout des réseaux profonds, est coûteux en termes de calcul et nécessite de grandes quantités de données d'entraînement.

II.7. Applications des RNAs en technologie

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) sont de plus en plus utilisés dans divers domaines, tirant parti de leur capacité à modéliser des relations complexes et à apprendre à partir de données. En génie civil, les RNAs sont appliqués à la prédiction des propriétés des matériaux, à la gestion des infrastructures et à l'analyse du comportement structurel. Par exemple, ils permettent d'optimiser la résistance du béton en fonction de sa composition, tout en prédisant sa durabilité face aux conditions environnementales. Dans le domaine de la santé, les RNAs sont utilisés pour le diagnostic médical, l'analyse d'images médicales et la prédiction de maladies, offrant des outils puissants pour améliorer la précision des soins. En finance, ils sont employés pour l'analyse des risques, la détection de fraudes et la prévision des tendances du marché, facilitant une prise de décision éclairée. D'autres domaines, tels que l'agriculture de précision, le traitement du langage naturel et la robotique, bénéficient également des capacités des RNAs, démontrant ainsi leur polyvalence et leur potentiel d'innovation. En somme, l'application des RNAs s'étend à de nombreux secteurs, ouvrant la voie à des solutions intelligentes et efficaces pour des problématiques variées.

II.7.1. Robotique et systèmes autonomes

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) jouent un rôle essentiel dans le développement de la robotique et des systèmes autonomes, en fournissant des capacités d'apprentissage et d'adaptation à des environnements complexes. Dans ce contexte, les RNAs sont utilisés pour améliorer la perception des robots, leur permettant de traiter des données provenant de capteurs variés, tels que des caméras, des lidars et des microphones. Grâce à des techniques telles que l'apprentissage par renforcement, les robots peuvent apprendre à interagir avec leur environnement de manière autonome, en optimisant leurs actions en fonction des retours d'expérience. Par ailleurs, les RNAs facilitent la planification de trajectoires et la navigation, en

permettant aux systèmes autonomes d'évaluer en temps réel les obstacles et de prendre des décisions éclairées. Des applications concrètes incluent les véhicules autonomes [116], qui utilisent des RNAs pour interpréter les signaux routiers, détecter d'autres usagers de la route et prendre des décisions de conduite sûres. En outre, dans le domaine de la robotique industrielle, les RNAs contribuent à l'automatisation des processus de fabrication [117], en permettant aux robots d'apprendre des tâches complexes et de s'adapter aux variations de l'environnement de travail.

II.7.2. Technologies de l'information et des communications

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) jouent un rôle transformateur dans les technologies de l'information et des communications (TIC), facilitant l'amélioration des systèmes de traitement et d'analyse des données. Dans ce domaine, les RNAs sont appliqués à diverses tâches, telles que la reconnaissance vocale, la traduction automatique [118] et l'analyse des sentiments [119]. Grâce à leur capacité à apprendre des modèles complexes à partir de grandes quantités de données, les RNAs permettent d'améliorer l'efficacité et la précision des systèmes de communication. Par exemple, dans la reconnaissance vocale, les RNAs peuvent analyser des signaux audio pour identifier et transcrire la parole, offrant ainsi une interface utilisateur plus intuitive pour les dispositifs intelligents. De plus, les RNAs sont utilisés pour le filtrage des spams et la détection des fraudes dans les systèmes de messagerie et les transactions en ligne [120], renforçant ainsi la sécurité des communications. En outre, les réseaux de neurones convolutionnels (CNNs) sont couramment employés pour le traitement d'images et de vidéos, permettant des applications telles que la reconnaissance d'objets et la surveillance vidéo intelligente.

II.7.3. Santé et biotechnologie

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) ont trouvé des applications significatives dans le domaine de la santé et de la biotechnologie, révolutionnant ainsi la manière dont les données médicales sont analysées et interprétées. Dans le secteur de la santé, les RNAs sont utilisés pour le diagnostic précoce de maladies, notamment par le biais de l'analyse d'images médicales [121, 122], où des réseaux de neurones convolutionnels (CNNs) permettent d'identifier des anomalies dans des radiographies, des IRM ou des scanners. De plus, les RNAs facilitent le traitement de grandes quantités de données génomiques, contribuant ainsi à des avancées dans la médecine personnalisée en prédisant la réponse des patients aux traitements en fonction de leur profil génétique. Dans le domaine de la biotechnologie, les RNAs sont également utilisés pour

modéliser des processus biologiques complexes et optimiser la découverte de nouveaux médicaments [123]. Grâce à leur capacité à apprendre des patterns à partir de données multidimensionnelles, les RNAs peuvent aider à identifier des cibles thérapeutiques et à concevoir des composés chimiques prometteurs [124]. En somme, l'intégration des RNAs dans la santé et la biotechnologie permet non seulement d'améliorer l'efficacité des diagnostics et des traitements, mais aussi de soutenir l'innovation dans la recherche biomédicale, ouvrant la voie à de nouvelles solutions pour des enjeux de santé publique.

II.7.4. Finance et Economie

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) ont un impact croissant dans le domaine de la finance et de l'économie, offrant des solutions avancées pour l'analyse des données et la prise de décision. Dans le secteur financier, les RNAs sont utilisés pour prédire les tendances des marchés [125], analyser le risque de crédit [126] et détecter des fraudes. Par exemple, des modèles de réseaux de neurones récurrents (RNNs) sont couramment appliqués pour la prévision des séries temporelles, permettant d'anticiper les fluctuations des prix d'actifs en se basant sur des données historiques. De plus, les RNAs peuvent améliorer la gestion de portefeuille en optimisant la répartition d'actifs et en identifiant des opportunités d'investissement en temps réel. Dans le domaine économique, les RNAs sont utilisés pour modéliser des comportements complexes et simuler des scénarios économiques, contribuant ainsi à des analyses plus précises des politiques publiques et des impacts économiques. Grâce à leur capacité à traiter de grandes quantités de données non structurées et à en extraire des insights significatifs, les RNAs permettent une approche plus dynamique et informée dans le secteur financier, favorisant une meilleure réactivité face aux changements du marché et aux crises économiques.

II.7.5. Éducation

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) trouvent également des applications significatives dans le domaine de l'éducation, où ils transforment les méthodes d'apprentissage et d'enseignement. Grâce à leur capacité à analyser des données complexes et à personnaliser l'expérience d'apprentissage, les RNAs peuvent contribuer à créer des systèmes d'éducation adaptatifs qui répondent aux besoins individuels des étudiants. Par exemple, ces réseaux peuvent être utilisés pour développer des plateformes d'apprentissage en ligne [127] qui ajustent le contenu et le rythme des cours en fonction des performances et des préférences des apprenants. De plus, les RNAs facilitent l'évaluation des compétences des étudiants en analysant leurs réponses aux questionnaires et en fournissant des feedbacks instantanés. Ils peuvent également

être appliqués dans des outils de tutorat intelligent, offrant une assistance personnalisée et ciblée pour aider les étudiants à surmonter des difficultés spécifiques. En intégrant des technologies d'analyse prédictive, les RNAs permettent d'identifier les élèves à risque d'échec [128], facilitant ainsi l'intervention précoce par les enseignants.

II.7.6. Agriculture et Environnement

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) jouent un rôle croissant dans les domaines de l'agriculture et de l'environnement, en offrant des solutions innovantes pour relever les défis liés à la sécurité alimentaire et à la durabilité écologique. Dans le secteur agricole, les RNAs sont utilisés pour analyser des données provenant de capteurs, d'images satellites et de systèmes de gestion des cultures afin de prédire les rendements [129, 130], d'optimiser l'irrigation [131] et de surveiller la santé des plantes [132, 133]. Par exemple, des modèles basés sur les RNAs peuvent identifier les maladies des cultures à partir d'images, permettant ainsi une intervention précoce et ciblée.

En ce qui concerne l'environnement, les RNAs contribuent à la modélisation des écosystèmes, à la prévision des catastrophes naturelles [134, 135] et à la gestion des ressources naturelles. Ils peuvent analyser des données climatiques pour prévoir les effets du changement climatique sur les habitats et les espèces, et aider à élaborer des stratégies de conservation. De plus, dans le cadre de la gestion des déchets et de la qualité de l'eau, les RNAs sont utilisés pour identifier des schémas dans les données de pollution, facilitant ainsi la prise de décision pour des interventions efficaces.

II.7.7. Énergie

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) trouvent également des applications significatives dans le secteur de l'énergie. Grâce à leur capacité à modéliser des systèmes complexes et à analyser de grandes quantités de données, les RNAs sont utilisés pour optimiser la production [136], la distribution [137] et la consommation d'énergie [138]. Par exemple, dans le domaine de l'énergie renouvelable, les RNAs peuvent prédire la production d'énergie à partir de sources telles que le solaire et l'éolien en fonction des conditions météorologiques, permettant ainsi une meilleure gestion des ressources. De plus, ils sont employés pour détecter et anticiper les pannes dans les réseaux électriques, améliorant ainsi la fiabilité des systèmes énergétiques. En intégrant les RNAs dans les systèmes de gestion de l'énergie, il devient possible d'améliorer l'efficacité énergétique, de réduire les coûts opérationnels et d'atteindre des objectifs de durabilité

environnementale. Ces capacités positionnent les RNAs comme des outils précieux dans la transition vers des systèmes énergétiques plus intelligents et plus durables.

II.8. Applications des RNAs dans le Génie Civil

II.8.1. Aperçu des applications des RNAs dans le génie civil

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) jouent un rôle crucial dans de nombreuses applications en génie civil grâce à leur capacité à apprendre à partir des données, à modéliser des relations non linéaires, et à s'adapter à de nouvelles situations. Ils sont utilisés pour prédire les propriétés des matériaux, comme la résistance à la compression du béton en fonction de sa composition et des conditions de cure, permettant ainsi d'optimiser la formulation du béton et de réduire les essais expérimentaux coûteux [139-141], évaluer la durabilité des structures en béton armé en fonction de facteurs environnementaux, contribuant ainsi à la conception de structures plus durables et à la planification de la maintenance [142, 143], et les propriétés mécaniques des sols telles que la résistance au cisaillement et la compressibilité, en fonction de leurs caractéristiques géotechniques [142, 144]. De plus, ils sont utilisés pour l'identification des dommages structurels, permettant une détection précoce et une intervention rapide [145, 146]. Les RNAs aident également à la gestion des risques naturels, en prédisant les inondations [147], les glissements de terrain [148, 149], et les séismes [148, 150]. Dans le contrôle et l'optimisation des systèmes d'infrastructure [151-153] ces modèles permettent d'optimiser le fonctionnement des systèmes et de réduire les coûts d'exploitation, optimisent les systèmes de transport en prédisant les flux de trafic et en contrôlant les feux de circulation [154]. Enfin, les RNAs analysent le comportement des structures sous différentes charges [155-157] et optimisent la conception structurale [141, 158, 159]. En offrant des solutions innovantes à des problèmes complexes, les RNAs ouvrent la voie à une nouvelle ère d'ingénierie intelligente.

II.8.2. Intégration des RNAs avec d'autres technologies pour l'ingénierie civile

Les avancées technologiques dans le domaine des réseaux de neurones artificiels (RNAs) et leur intégration avec d'autres méthodes ouvrent de nouvelles perspectives pour l'ingénierie civile, permettant le développement de modèles plus performants et l'élargissement de leurs applications. Le Deep Learning, utilisant des réseaux de neurones profonds pour des tâches complexes, intègre l'Internet des objets (IoT) dans divers domaines d'application en génie civil, telles que les réseaux convolutif (CNNs) pour analyser les images de structures et de sols [160], et les réseaux récurrents (RNNs) pour prédire des séries chronologiques comme les flux de trafic

[107]. L'intégration des RNAs avec les systèmes d'information géographique (SIG) permet de prédire les risques naturels et d'optimiser la gestion des infrastructures en utilisant des données spatiales [161, 162]. Le couplage avec la modélisation par éléments finis (MEF) combine la précision de la MEF avec la capacité d'apprentissage des RNAs pour calibrer des modèles et prédire le comportement des structures sous différentes conditions [163, 164]. De plus, l'apprentissage par renforcement est utilisé pour le contrôle et l'optimisation de systèmes complexes d'infrastructure et pour entraîner des robots en génie civil à réaliser des tâches telles que l'inspection et la maintenance. En conclusion, l'intégration des RNAs avec le Deep Learning, les SIG, la MEF et des autres permet de développer des systèmes d'aide à la décision plus puissants, contribuant à la conception, à l'analyse et à la gestion d'infrastructures plus sûres, durables et efficaces.

II.8.3. Perspectives d'avenir pour les RNAs dans les structures d'ingénierie

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) sont sur le point de révolutionner l'ingénierie des structures en offrant des capacités accrues pour la conception, l'analyse, la construction et la gestion des infrastructures. Leur aptitude à apprendre à partir de données, à s'adapter à de nouvelles situations et à identifier des relations complexes promet de transformer la manière dont les ingénieurs abordent les défis structurels. Les perspectives d'avenir incluent l'optimisation structurale par la conception générative et l'intégration avec des algorithmes d'optimisation, la surveillance et la maintenance prédictive des structures grâce à l'analyse des données de capteurs, et l'intégration avec l'Internet des objets (IoT) et le cloud computing pour créer des systèmes de surveillance intelligents. Les RNAs peuvent également être essentiels dans la construction robotisée, automatisant des tâches complexes pour améliorer la précision et réduire les coûts de main-d'œuvre, et dans la gestion des infrastructures intelligentes (Smart Cities), optimisant les réseaux de transport, d'eau potable, électriques et de gestion des déchets. Enfin, ils peuvent modéliser et prédire le comportement des matériaux avancés, facilitant la conception de structures plus performantes, légères et durables.

II.9. Conclusion

Ce chapitre a exploré les principes fondamentaux des réseaux de neurones artificiels (RNAs) et leur application croissante en ingénierie, notamment dans le domaine du génie civil. S'inspirant du fonctionnement du cerveau humain, les RNAs offrent une approche puissante pour la modélisation, la prédiction et le contrôle de systèmes complexes. Nous avons vu que les RNAs sont constitués de neurones artificiels interconnectés qui reçoivent, pondèrent et combinent des

signaux d'entrée pour produire une sortie, avec leur architecture déterminée par l'organisation des neurones en couches et le choix des fonctions d'activation. L'apprentissage des RNAs, via l'algorithme de rétropropagation du gradient permet d'ajuster les poids synaptiques pour minimiser l'erreur par rapport à la sortie souhaitée. L'évaluation des performances des RNAs repose sur des métriques d'erreur comme le MSE, le RMSE et le MAPE, ainsi que sur le coefficient de corrélation de Pearson (R), et la validation des modèles par des techniques comme la validation croisée est essentielle pour assurer leur capacité de généralisation. Les RNAs promettent de transformer l'ingénierie moderne, offrant des solutions innovantes à des problèmes complexes et ouvrant la voie à une nouvelle ère d'ingénierie intelligente. La recherche continue sur les RNAs et leur intégration avec d'autres technologies promet de nouvelles avancées significatives, avec des implications profondes pour la pratique en ingénierie et la création de systèmes plus performants, durables et sûrs.

**Chapitre III : Étude analytique du
comportement d'interface d'une poutre
en béton armé renforcée par plaque
composite de type bio-inspiré sous l'effet
hygro-thermo-mécanique**

III.1. Introduction

Dans le cadre de la réhabilitation des structures en béton armé (BA), l'utilisation de plaques en polymère renforcé de fibres (FRP) s'est imposée comme une solution efficace pour renforcer les poutres endommagées. Toutefois, les conditions environnementales, telles que les effets hygrothermiques, peuvent affecter de manière significative la performance des renforts appliqués. Dans le but d'améliorer la compréhension et la prédiction de ces effets, ce chapitre examine le comportement des poutres en béton armé endommagées et renforcées par des plaques stratifiées hélicoïdales bio-inspirées, sous l'influence de charges mécaniques, thermiques et hygrothermiques.

L'approche bio-inspirée adoptée pour la conception des plaques laminées en FRP s'appuie sur des principes naturels, permettant une meilleure gestion des contraintes et une amélioration de la durabilité. Grâce à leur configuration hélicoïdale, ces plaques assurent une distribution plus uniforme des charges, réduisant ainsi les concentrations de contraintes à l'interface entre le renfort et le béton.

L'orientation des fibres adjacentes à l'adhésif joue un rôle déterminant en réduisant les sollicitations normales et tangentielles sur la colle de contact. Cette caractéristique rend ce matériau particulièrement intéressant pour le renforcement des poutres, notamment vis-à-vis des sollicitations de flexion et de cisaillement.

Ce chapitre se concentre sur l'analyse des contraintes interfaciales normales et de cisaillement en s'appuyant sur un modèle analytique visant à étudier les performances des renforts sous différentes conditions de charge. Un accent particulier est mis sur l'influence de paramètres tels que l'épaisseur de la plaque, la rigidité des matériaux, et la configuration des couches sur la réponse structurelle des poutres renforcées. En outre, les effets combinés des charges hygrothermiques et mécaniques seront étudiés afin d'évaluer la durabilité et les performances à long terme des structures renforcées avec des plaques FRP bio-inspirées.

Néanmoins, cela peut également réduire la résistance mécanique du composite. Le concept de composites bio-inspirés semble offrir une solution intermédiaire qui optimise à la fois la résistance du composite et la performance de l'adhésif. Cette approche vise à exploiter les avantages des différentes orientations des fibres pour trouver un équilibre entre la résistance du patch et la durabilité de l'adhésif, constituant ainsi l'un des objectifs principaux de ce travail. En plus de ce défi structurel, l'effet hygrothermique peut affecter l'interface en compromettant la durabilité de l'adhésif [165, 166]. Cela représente le second axe principal de cette étude.

Cette recherche présente un nouveau stratifié composite bio-inspiré destiné au renforcement des poutres en béton armé endommagées. L'accent est principalement mis sur l'évaluation des contraintes de cisaillement interfaciales, c'est-à-dire celles qui se manifestent à l'interface entre le stratifié et le substrat en béton. L'impact de l'humidité, des hautes températures, ainsi que des conditions hygrothermiques combinées sur la durabilité de l'interface entre le béton et les matériaux de renforcement est pris en compte [165, 166].

Un modèle analytique a été élaboré pour déterminer la contrainte maximale de cisaillement critique à la terminaison du stratifié. Ce modèle est capable de traiter des poutres avec diverses géométries de section transversale et propriétés matérielles. La validité de ce modèle a été confirmée par un accord favorable avec les résultats obtenus à partir d'analyses indépendantes. De plus, une étude paramétrique a été réalisée pour éclaircir l'impact de différentes caractéristiques géométriques et matérielles sur l'ampleur des contraintes de cisaillement interfaciales.

III.2. Revue sur les matériaux bio-inspirés

Au cours des dernières décennies, les progrès dans le domaine des matériaux composites, en particulier ceux renforcés par des fibres (FRP), ont ouvert la voie à l'exploration de nouveaux designs bio-inspirés, notamment les stratifiés hélicoïdaux. Ces structures innovantes sont inspirées de modèles biologiques tels que les coquilles de mollusques et les exosquelettes d'insectes, reconnus pour leur capacité à résister à des environnements extrêmes tout en maintenant une robustesse et une durabilité exceptionnelles. La biomimétique, en tant que discipline scientifique, permet d'adapter ces configurations naturelles aux matériaux modernes, notamment les composites FRP, afin d'exploiter les avantages structurels qu'elles confèrent.

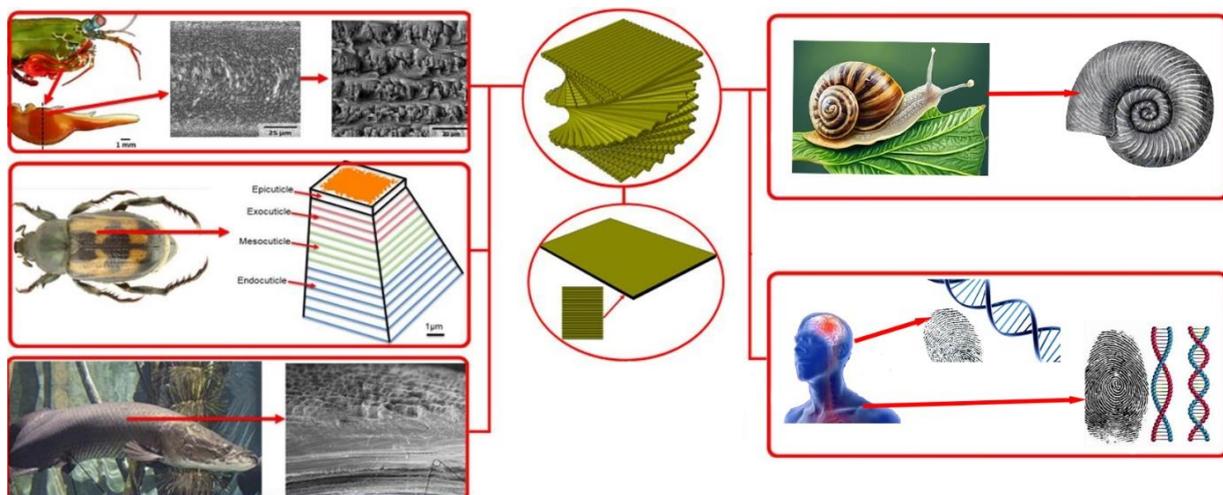


Figure III.1: Structures composites hélicoïdales bio- inspirées [167]

Les stratifiés hélicoïdaux, qui présentent une organisation en spirale des fibres, imitent la structure multicouche observée dans certaines espèces marines. Cet agencement permet une distribution plus homogène des contraintes mécaniques [168, 169], minimisant ainsi les points de faiblesse où des ruptures pourraient survenir. Les recherches montrent que cette architecture renforce les capacités des composites FRP en augmentant leur résistance aux chocs, leur force mécanique, et leur résilience [170], parfois de 30 à 50 % par rapport aux stratifiés traditionnels.

Sur le plan des propriétés mécaniques, l'orientation hélicoïdale des fibres confère aux stratifiés une capacité supérieure d'absorption d'énergie [169], ce qui se traduit par une amélioration notable de la ténacité [171-173]. Cette caractéristique est cruciale dans des secteurs industriels exigeants tels que l'aéronautique ou l'ingénierie civile. Les travaux de recherche [168, 169] ont démontré que ces composites offrent une résistance accrue à la propagation des fissures, réduisant jusqu'à 40 % les risques de fracture par rapport aux composites conventionnels. Ce comportement est attribuable à l'agencement hélicoïdal, qui empêche la concentration des contraintes à des points spécifiques [173], prolongeant ainsi la durée de vie en fatigue du matériau. La figure III.1 illustre diverses sources biologiques à partir desquelles des structures hélicoïdales peuvent être dérivées

L'un des avantages majeurs des stratifiés hélicoïdaux FRP est leur adaptabilité à divers environnements et applications. Leur légèreté et leur résistance exceptionnelle en font des matériaux de choix pour les infrastructures modernes nécessitant à la fois robustesse et efficacité énergétique. Des études [168] ont mis en évidence leur utilisation potentielle dans des conditions extrêmes telles que les environnements sous-marins ou spatiaux, sans compromettre l'intégrité structurelle. En outre, ces matériaux répondent aux préoccupations actuelles en matière d'ingénierie durable, en réduisant la quantité de matériaux nécessaires tout en optimisant leurs performances mécaniques. Comparés aux composites classiques, les stratifiés hélicoïdaux contribuent à diminuer l'empreinte écologique des projets d'ingénierie grâce à leur durabilité accrue et à une utilisation plus efficace des ressources.

Ainsi, la combinaison de la bio-inspiration et des avancées technologiques dans le domaine des composites renforce le potentiel des stratifiés hélicoïdaux FRP en tant que solutions légères, durables et performantes. Ces matériaux s'avèrent particulièrement prometteurs pour relever les défis contemporains dans les secteurs de la construction, du transport et de la gestion des ressources, tout en répondant aux exigences croissantes de durabilité et d'efficacité énergétique. L'évolution continue de ces technologies promet d'apporter des innovations majeures, tant dans le domaine des matériaux que dans les méthodes de fabrication, permettant ainsi une

personnalisation avancée pour des applications spécifiques. Il devient de plus en plus pertinent d'explorer les mécanismes de renforcement de ces stratifiés, leur processus de fabrication ainsi que leurs applications dans des industries diverses telles que l'aéronautique, l'ingénierie civile, et les infrastructures marines. Ces perspectives, axées sur la recherche et l'innovation, laissent entrevoir un avenir prometteur pour les matériaux composites bio-inspirés dans le cadre de l'ingénierie moderne.

III.3. Modèle analytique pour une poutre renforcée par matériaux bio-inspirés

III.3.1. Hypothèses de base

Cette section décrit les hypothèses clés pour un modèle analytique visant à prédire les contraintes de cisaillement et normales à l'interface entre les poutres en béton armé endommagées et les plaques composites bio-inspirées.

- **Élasticité Linéaire** : L'hypothèse du comportement élastique linéaire est faite pour tous les matériaux impliqués (béton, composite, adhésif).
- **Géométrie de la Poutre** : La poutre en béton armé est supposée être simplement appuyée, permettant l'application de la théorie de Saint-Venant.
- **Collage Parfait** : Aucun glissement n'est supposé aux interfaces entre la couche adhésive et soit la poutre en béton endommagée, soit la plaque composite bio-inspirée.
- **Déformation Adhésive Négligée** : Les déformations de flexion au sein de la couche adhésive sont négligées, simplifiant l'analyse.
- **Distribution Uniforme des Contraintes** : Les contraintes à travers la couche adhésive sont supposées constantes et ne varient pas avec son épaisseur.
- **Hypothèse d'Analyse des Contraintes de Cisaillement** : Les courbures de la poutre et de la plaque composite bio-inspirée sont supposées égales pour l'analyse des contraintes de cisaillement.

L'hypothèse des courbures égales pour l'analyse des contraintes de cisaillement et normales est soutenue par des recherches antérieures menées par Tounsi [9], Yang and Wu [11], Bouchikhi, Lousdad [174], Benyoucef, Tounsi [175], Daouadji, Rabahi [176], Antar, Amara [177]

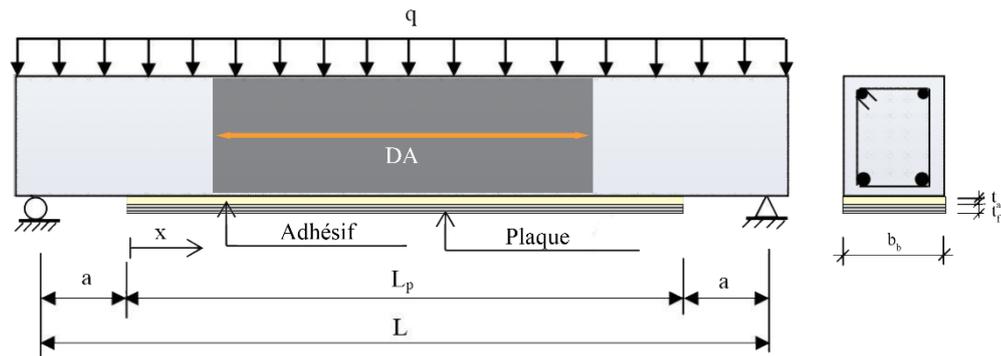


Figure III.2: Poutre en béton endommagée et renforcée par une plaque FRP bio-inspirée.

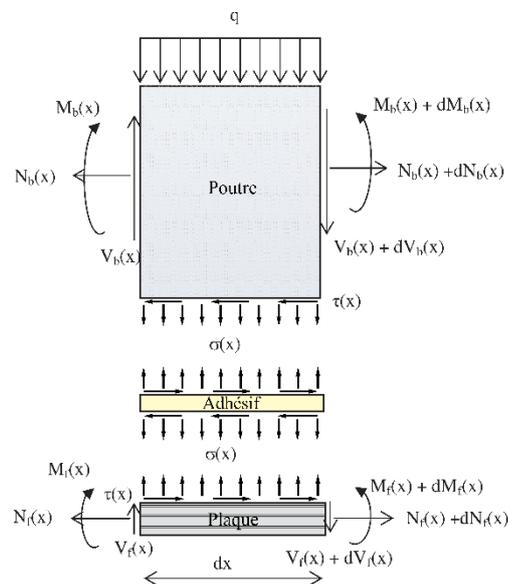


Figure III.3: Forces d'équilibre d'une bande infinitésimale d'une poutre en béton armé suivant l'axe X

III.3.2. Plaques de renforcement en matériau bio-inspiré

Cette section détaille les trois conceptions bio-inspirées envisagées pour les plaques composites stratifiées hélicoïdales :

- Hélicoïdal-récurif (HR) : Cette conception utilise une approche récursive pour définir le chemin des fibres dans le stratifié.
- Hélicoïdal-exponentielle (HE) : Le chemin des fibres dans cette conception suit une fonction exponentielle.
- Hélicoïdal-sémi-circulaire (HS) : Cette conception intègre un motif sémi-circulaire pour le chemin des fibres.

Des vues isométriques de ces configurations sont présentées dans la Figure III.4 pour référence visuelle. Un tableau récapitulatif présentant les détails clés de chaque conception est fourni dans le Tableau III.1.

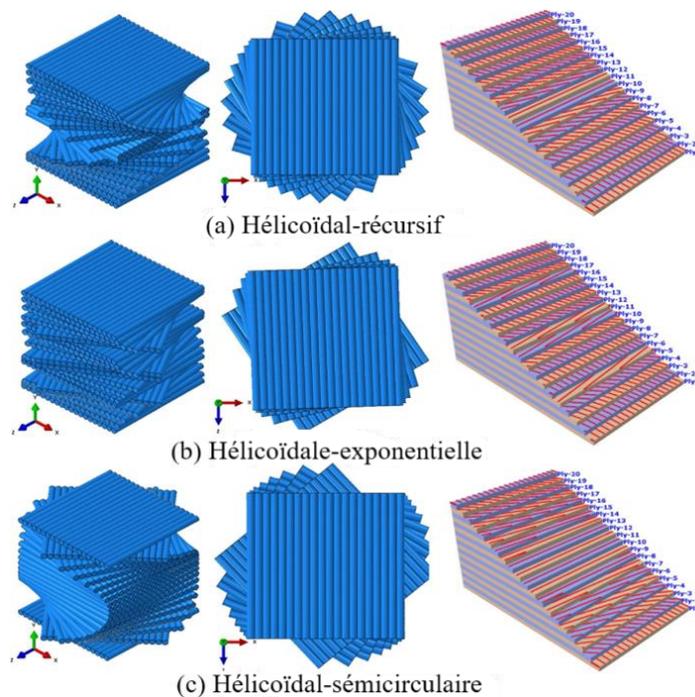


Figure III.4: A Représentation schématique des plaques composites stratifiées [178].

Tableau III.1 : Variation de la configuration des modèles hélicoïdaux en fonction du nombre de couches.

Nomenclature	Nombre de couches				
	12	16	20	24	28
Hélicoïdal-récurif HR1($\beta=1$) $\theta_1/\theta_2/\theta_3/ \dots \theta_n$ $= \theta_{n-1} + \beta(n - 1)$	[0/1/3/6/10/15] _s	[0/1/3/6/10/16/21/28] _s	[0/1/3/6/10/16/21/28/36/45] _s	[0/1/3/6/10/16/21/28/36/45/55/66] _s	[0/1/3/6/10/16/21/28/36/45/55/66/78/91] _s
Hélicoïdale-exponentielle HE3($\gamma=3$) $\theta_1/\theta_2/\theta_3/ \dots \theta_n = \gamma^n$	[3/9/27] _{2s}	[3/9/27/81] _{2s}	[3/9/27/81/243] _{2s}	[3/9/27/81/243/729] _{2s}	[3/9/27/81/243/729/2187] _{2s}
Hélicoïdal-sémicirculaire HS ($\varphi=90$) $\theta_1/\theta_2/\theta_3/ \dots \theta_n$ $= \sqrt{\varphi^2 - (\rho(n - 1) - \varphi)^2}$	[0/54/72/82.5/88.2/90] _s $\rho = 18$	[0/46.6/63.3/74.2/81.6/86.5/89.2/90] _s $\rho = 13$	[0/41.2/56.5/67.1/74.8/80.6/84.9/87.7/89.4/90] _s $\rho = 10$	[0/37.1/51.2/61.2/68.8/74.8/79.6/83.3/86.2/88.2/89.4/90] _s $\rho = 8$	[0/34.8/48.2/57.8/65.2/71.2/76.1/80.1/83.3/85.9/87.7/89/89.8/90] _s $\rho = 7$

Le Tableau III.1 illustre la variation dans les configurations de conception hélicoïdale en fonction du nombre de couches pour trois types de feuilles composites renforcées bio-inspirées : Hélicoïdal-Récurif (HR), Hélicoïdale-Exponentielle (HE), et Hélicoïdal-Sémicirculaire (HS). Chaque conception utilise une approche distincte pour définir le chemin des fibres dans le stratifié. Le type HR utilise une approche récursive, le type HE suit une fonction exponentielle, et le type HS intègre un motif semi-circulaire. Les configurations de couches sont spécifiées par

les angles θ pour chaque type, variant selon le nombre de couches (12, 16, 20, 24, 28). Le tableau montre également le paramètre ρ , représentant la densité de couche pour chaque conception. Par exemple, pour le type HR avec 12 couches, la séquence angulaire est [0/1/3/6/10/15]_s, tandis que pour le type HE avec 24 couches, la séquence est [3/9/27/81/243/729]_{2s}. Pour le type HS, les angles varient selon la formule spécifique de l'approche semi-circulaire. Ce tableau offre un aperçu des variations structurelles possibles pour optimiser la performance des plaques renforcées dans différentes configurations de couches.

Comme démontré par Herakovich [179], les variations observées dans les modules effectifs du stratifié composite découlent de deux facteurs clés : l'orientation des plis individuels dans le stratifié et la configuration globale des motifs du stratifié eux-mêmes (HR, HE et HS). En analysant la réponse contrainte-déformation et en comprenant l'influence de l'orientation des fibres et de la configuration du stratifié, cette étude cherche à fournir des informations précieuses sur la performance mécanique des structures renforcées avec ces matériaux composites bio-inspirés.

En appliquant cette théorie à une plaque composite symétrique [179], la déformation du plan médian ε_x^0 et la courbure k_x de la plaque composite sont données comme suit:

$$\varepsilon_x^0 = A'_{11} N_x \frac{1}{b_f} \quad \text{et} \quad k_x = D'_{11} M_x \frac{1}{b_f} \quad \text{III.1}$$

Ici, le terme [A'] représente l'inverse de la matrice de rigidité en extension [A], tandis que [D'] désigne l'inverse de la matrice de rigidité en flexion [D]. La variable b_f indique la largeur de la plaque BHCL. Les éléments des matrices [A] et [D] sont élaborés explicitement, fournissant un cadre détaillé pour l'évaluation du comportement mécanique des plaques composites symétriques sous des charges appliquées.

$$A_{m,n} = \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{m,n}^k (h_k - h_{k-1}) \quad \text{III.2}$$

et

$$D_{m,n} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{m,n}^k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad \text{III.3}$$

Ou ;

$$\begin{aligned}
 \bar{Q}_{11} &= \left(\frac{E_{f11}}{1 - \nu_{f12}\nu_{f21}} \right) \cos^4(\theta_k) + \left(\frac{E_{f22}}{1 - \nu_{f12}\nu_{f21}} \right) \sin^4(\theta_k) + 2 \left(\frac{\nu_{f12} E_{f22}}{1 - \nu_{f12}\nu_{f21}} + 2G_{f12} \right) \cos^2(\theta_k) \sin^2(\theta_k) \\
 \bar{Q}_{22} &= \left(\frac{E_{f11}}{1 - \nu_{f12}\nu_{f21}} \right) \sin^4(\theta_k) + \left(\frac{E_{f22}}{1 - \nu_{f12}\nu_{f21}} \right) \cos^4(\theta_k) + 2 \left(\frac{\nu_{f12} E_{f22}}{1 - \nu_{f12}\nu_{f21}} + 2G_{f12} \right) \cos^2(\theta_k) \sin^2(\theta_k) \\
 \bar{Q}_{12} &= \frac{\nu_{f12} E_{f22}}{1 - \nu_{f12}\nu_{f21}} (\cos^4(\theta_k) + \sin^4(\theta_k)) + \left(\frac{E_{f11}}{1 - \nu_{f12}\nu_{f21}} + \frac{E_{f22}}{1 - \nu_{f12}\nu_{f21}} - 4G_{f12} \right) \cos^2(\theta_k) \sin^2(\theta_k) \\
 \bar{Q}_{33} &= G_{f12}
 \end{aligned} \tag{III.4}$$

Ou E_{f11} , E_{f22} , ν_{f12} , ν_{f21} , and G_{f12} représentent respectivement le module de Young, le coefficient de Poisson et le module de cisaillement du matériau composite. La variable k indique le nombre de couches dans le stratifié, h_k signifie l'épaisseur de chaque couche, $\bar{Q}_{m,n}$ représente le tenseur élastique de Hooke pour chaque couche, et θ_k indique l'orientation des fibres dans chaque couche. L'indice N indique le nombre total de couches dans la plaque stratifiée en CFRP. Le calcul de $\bar{Q}_{m,n}$ s'appuie sur la théorie des plaques orthotropes hors axe, qui fournit un cadre permettant de comprendre le comportement du matériau composite en fonction des propriétés spécifiques des couches, notamment l'épaisseur, la réponse élastique et l'alignement des fibres.

III.3.3. Poutres en béton endommagées

Le cadre du modèle dépend de la formulation de Mazars, qui intègre l'élasticité couplée à l'endommagement isotrope, tout en excluant la plasticité et les phénomènes de fermeture des fissures [180]. Cette approche caractérise précisément la réduction de la rigidité et la réponse d'adoucissement. La contrainte est précisément délimitée par l'expression suivante :

$$\tilde{E}_{b11} = E_{b11}(1 - \phi) \tag{III.5}$$

$$\tilde{E}_{b22} = E_{b22}(1 - \phi) \tag{III.6}$$

$$\sigma_{ij} = (1 - \phi)E_{ij}\varepsilon_{ij} \tag{III.7}$$

Où \tilde{E}_{b11} , \tilde{E}_{b22} and E_{b11} , E_{b22} eprésentent les constantes élastiques des états endommagé et non endommagé de la poutre, respectivement, " ϕ " désigne la variable d'endommagement et l'indice « b » désigne la poutre. Par conséquent, les caractéristiques matérielles de la poutre endommagée peuvent être exprimées en remplaçant les constantes élastiques susmentionnées par les constantes effectives définies dans les équations (III.5) et (III.6).

III.3.4. Équations d'équilibre élastique

La figure III.2 illustre un élément différentiel d'une poutre plaquée, élucidant les déformations subies à la base de la poutre RC et au sommet du panneau en polymère renforcé de fibres (FRP) résultant des déformations axiales, de flexion et de cisaillement de l'adhésif dans la structure plaquée et la poutre elle-même :

$$\varepsilon_b(x) = \frac{du_b(x)}{dx} = \frac{y_b}{\tilde{E}_{b11}I_b} M_b(x) + \frac{N_b(x)}{\tilde{E}_{b11}A_b} + \chi_b \frac{d\tau(x)}{dx} + \alpha_b \Delta T + \beta_b \Delta C \quad \text{III.8}$$

$$\varepsilon_f(x) = \frac{du_f(x)}{dx} = -D'_{11} M_f \frac{1}{b_f} A'_{11} N_f \frac{1}{b_f} - \chi_f \frac{d\tau(x)}{dx} + \alpha_f \Delta T + \beta_f \Delta C \quad \text{III.9}$$

$N(x)$ et $M(x)$ représentent les forces axiales et les moments de flexion dans la poutre en béton armé et le panneau FRP, respectivement. α_b , α_f désignent les coefficients de dilatation thermique, tandis que β_b , β_f signifient les coefficients de dilatation hygroscopique de la poutre en béton armé et de la plaque. ΔT et ΔC représentent les changements de température et de teneur en humidité, respectivement.

Les coefficients χ_b et χ_f sont considérés comme la fonction des effets de cisaillement de l'adhérence [1, 181]. Ils dépendent de la distribution des contraintes de cisaillement sur l'épaisseur de la poutre en béton armé et du panneau en FRP. En outre, ils peuvent être déterminés sur le modèle :

- Modèle : $\chi_b = \frac{t_b}{4 G_b}$ and $\chi_f = \frac{5 t_f}{12 G_f}$ basé sur une distribution de contraintes de cisaillement parabolique à l'épaisseur de la poutre et du panneau BHLC [181]. G_b et G_f sont les modules de cisaillement transversal de la poutre et du panneau FRP, respectivement.

III.3.5. Distribution des contraintes de cisaillement au long de l'interface FRP-Poutre :

La figure III.2 montre un élément différentiel d'une poutre plaquée, où les contraintes de cisaillement et normales interfaciales sont notées $\tau(x)$ and $\sigma_n(x)$, La contrainte de cisaillement dans la couche adhésive utilisée par Daouadji, Rabahi [176] et Antar, Amara [177] est donnée par :

$$\tau_a = \tau(x) = K_S [u_f(x) - u_b(x)] \quad \text{ou} \quad K_S = \frac{G_a}{t_a} \quad \text{III.10}$$

En faisant la différence avec l'expression ci-dessus, on obtient :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_S \left[\frac{du_f(x)}{dx} - \frac{du_b(x)}{dx} \right] \quad \text{III.11}$$

ou

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_S [\varepsilon_f(x) - \varepsilon_b(x)] \quad \text{III.12}$$

En considérant l'équilibre horizontal, on obtient :

$$\frac{dN_b(x)}{dx} = \frac{dN_f(x)}{dx} = b_f \tau(x) \quad \text{III.13}$$

$$N_b(x) = N_f(x) = N(x) = b_f \int_0^x \tau(x) dx \quad \text{III.14}$$

En supposant une courbure égale dans la poutre et la plaque de renforcement, la relation entre les moments dans les deux adhérents peut être exprimée comme :

$$M_b(x) = \frac{\tilde{E}_b I_b D'_{11}}{b_f} M_f(x) \quad \text{III.15}$$

$$R = \frac{\tilde{E}_b I_b D'_{11}}{b_f} \quad \text{III.16}$$

Le moment d'équilibre du segment différentiel de la poutre plaquée donne :

$$M_T(x) = M_b(x) + M_f(x) + N(x)(y_b + y_f + t_a) \quad \text{III.17}$$

Où $M_T(x)$ représente le moment total appliqué. Le moment de flexion dans chaque adhérent est exprimé comme une fonction du moment total appliqué et de la contrainte de cisaillement interfaciale :

$$M_b(x) = \frac{R}{R+1} \left[M_T(x) - b_f \int_0^x \tau(x)(y_b + y_f + t_a) dx \right] \quad \text{III.18}$$

$$M_f(x) = \frac{1}{R+1} \left[M_T(x) - b_f \int_0^x \tau(x)(y_b + y_f + t_a) dx \right] \quad \text{III.19}$$

En prenant la dérivée de l'expression ci-dessus, nous obtenons :

$$V_b(x) = \frac{dM_b(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} [V_T(x) - b_f \tau(x)(y_b + y_f + t_a)] \quad \text{III.20}$$

$$V_f(x) = \frac{dM_f(x)}{dx} = \frac{1}{R+1} [V_T(x) - b_f \tau(x)(y_b + y_f + t_a)] \quad \text{III.21}$$

En substituant les équations (III.9) et (III.8) à l'équation (III.12) et en différenciant ensuite l'équation résultante une fois, nous obtenons :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = & K_S \left(\frac{-t_f}{b_f} D'_{11} \frac{dM_f(x)}{dx} + \frac{A'_{11}}{b_f} \frac{dN_f(x)}{dx} - \frac{y_b}{\tilde{E}_b I_b} \frac{dM_b(x)}{dx} + \frac{1}{\tilde{E}_b A_b} \frac{dN_1(x)}{dx} \right) \\ & - K_S \left(\frac{t_b}{4 G_b} + \frac{5 t_f}{12 G_f} \right) \frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} \end{aligned} \quad \text{III.22}$$

En substituant les forces de cisaillement Eqs. (III.20) et (III.21) et les forces axiales Eq.(III.14) dans l'Eq. (III.22), on obtient l'équation différentielle suivante pour la contrainte de cisaillement interfaciale :

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - K_1 \left(A'_{11} + \frac{b_f}{\bar{E}_b} + \frac{(y_b + y_f)(y_b + y_f + t_a)}{\bar{E}_b I_b D'_{11} + b_f} b_f D'_{11} \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{y_b + y_f}{\bar{E}_b I_b D'_{11} + b_f} \right) V_T(x) = 0 \quad \text{III.23}$$

$$\text{Ou} \quad K_1 = \frac{1}{\left(\frac{t_a}{G_a} + \chi_b + \chi_f \right)} \quad \text{III.24}$$

Pour simplifier, les solutions générales suivantes sont considérées uniquement pour une charge répartie uniformément sur toute la longueur de la poutre. Dans de telles conditions de chargement, la valeur de $d^2V_T(x)/dx^2 = 0$, et une solution générale pour l'équation (III.23) est donnée comme suit :

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad \text{III.25}$$

où

$$\lambda^2 = K_1 \left(A'_{11} + \frac{b_f}{\bar{E}_b A_b} + \frac{(y_b + y_f)(y_b + y_f + t_a)}{\bar{E}_b I_b D'_{11} + b_f} b_f D'_{11} \right) \quad \text{III.26}$$

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{y_b + y_f}{\bar{E}_b I_b D'_{11} + b_f} D'_{11} \right) \quad \text{III.27}$$

B_1 et B_2 sont des coefficients constants déterminés à partir des conditions aux limites. L'étude actuelle examine une poutre simplement appuyée soumise à une charge uniformément répartie (Figure III.1). La contrainte de cisaillement interfaciale pour cette charge en tout point est exprimée comme suit :

$$\tau(x) = B_2 e^{-\lambda x} + m_1 Q \left(\frac{L}{2} - a - x \right) \quad \text{III.28}$$

$$B_2 = \left(\frac{m_2 a (L-a)}{2} - m_1 \right) \frac{Q}{\lambda} + \frac{K_1}{\lambda} (\alpha_b - \alpha_f) \Delta T + \frac{K_1}{\lambda} (\beta_b - \beta_f) \Delta C \quad \text{III.29}$$

$$m_2 = K_1 \frac{y_b}{\bar{E}_b I_b} \quad \text{III.30}$$

Où Q représente la charge uniformément répartie, tandis que x , a et L sont définis dans la Figure III.1.

III.3.6. Distribution de la contrainte normale au long de l'interface FRP-Poutre :

L'expression de la contrainte normale dans la couche adhésive utilisée par Daouadji, Rabahi [176] and Antar, Amara [177] est donnée par :

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_f(x) - w_b(x)] \quad \text{III.31}$$

Où $w_b(x)$ and $w_f(x)$ représentent les déplacements verticaux des adhérents b et f , respectivement.

La différentiation de l'Eq.III.31 deux fois donne :

$$\frac{d^2\sigma_n(x)}{dx^2} = K_n \left[\frac{d^2w_f(x)}{dx^2} - \frac{d^2w_b(x)}{dx^2} \right] \quad \text{III.32}$$

En considérant les relations moment-courbure pour la poutre à renforcer et pour le renforcement externe, respectivement :

$$\frac{d^2w_b(x)}{dx^2} = -\frac{M_b(x)}{\tilde{E}_b I_b}, \quad \frac{d^2w_2(x)}{dx^2} = -\frac{D'_{11}M_f(x)}{b_f} \quad \text{III.33}$$

L'équilibre des adhérents b et f conduit aux relations suivantes :

$$\frac{dM_b(x)}{dx} = V_b(x) - b_f y_b \tau(x) \quad \text{and} \quad \frac{dV_b(x)}{dx} = -b_f \sigma_n(x) - Q \quad \text{III.34}$$

$$\frac{dM_f(x)}{dx} = V_f(x) - b_f y_f \tau(x) \quad \text{and} \quad \frac{dV_f(x)}{dx} = b_f \sigma_n(x) \quad \text{III.35}$$

Sur la base des équations d'équilibre décrites ci-dessus, les équations différentielles régissant la déformation des adhérents b et f, exprimées en termes des contraintes de cisaillement et normales interfaciales, sont les suivantes :

$$\frac{d^4w_b(x)}{dx^4} = \frac{1}{\tilde{E}_b I_b} b_f \sigma(x) + \frac{y_b}{\tilde{E}_b I_b} b_f \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{\tilde{E}_b I_b} \quad \text{III.36}$$

$$\frac{d^4w_f(x)}{dx^4} = -D'_{11} \sigma(x) + y_f D'_{11} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad \text{III.37}$$

En substituant les équations (III.36) et (III.37) à la dérivée quatrième de la contrainte normale interfaciale dérivée de l'équation (III.31), on obtient l'équation différentielle suivante pour la contrainte normale interfaciale :

$$\frac{d^4\sigma_n(x)}{dx^4} + \frac{E_a}{t_a} \left(D'_{11} + \frac{b_f}{\tilde{E}_b I_b} \right) \sigma_n(x) + \frac{E_a}{t_a} \left(D'_{11} y_f + \frac{y_b b_f}{\tilde{E}_b I_b} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{Q E_a}{t_a \tilde{E}_b I_b} = 0 \quad \text{III.38}$$

La solution générale de cette équation différentielle du quatrième ordre est :

$$\begin{aligned} \sigma_n(x) = & e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] \\ & - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 Q \end{aligned} \quad \text{III.39}$$

Pour de grandes valeurs de x, on suppose que la contrainte normale s'approche de zéro, ce qui donne C3 = C4 = 0. Par conséquent, la solution générale devient :

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 Q \quad \text{III.40}$$

où

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_a b_f}{4 t_a} \left(D'_{11} + \frac{b_f}{\bar{E}_b I_b} \right)} \quad \text{III.41}$$

$$n_1 = \frac{y_b b_f - D'_{11} \bar{E}_b I_b y_f}{\bar{E}_b I_b D'_{11} + b_f} \quad \text{III.42}$$

$$n_2 = \frac{1}{\bar{E}_b I_b D'_{11} + b_f} \quad \text{III.43}$$

C1 et C2 sont des coefficients constants déterminés à partir des conditions aux limites.

$$C_1 = \frac{E_a}{2\beta^3 t_a \bar{E}_b I_b} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad \text{III.44}$$

$$C_2 = -\frac{E_a}{2\beta^2 t_a \bar{E}_b I_b} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad \text{III.45}$$

$$\text{Où } n_3 = \frac{E_a b_f}{t_a} \left(\frac{y_b}{\bar{E}_b I_b} - \frac{D'_{11} y_f}{b_f} \right) \quad \text{III.46}$$

III.4. Modèle Analytique Pour Une Poutre Renforcée par Monocouche

Dans le cas de l'étude prédictive dans le chapitre qui suit, ce type de renfort va être utilisé pour des raisons de validation. On a traité un modèle d'une poutre endommagée renforcée par une plaque de FRP monocouche. La poutre est soumise à une charge uniformément répartie.

Les déformations à la base de l'adhérent 1 et au sommet de l'adhérent 2, en considérant les trois composantes des déformations axiales, de flexion et de cisaillement de l'adhérent, sont données par Tounsi [9] :

$$\varepsilon_1^N(x) = \frac{du_1^N(x)}{dx} = \frac{y_1}{\tilde{E}_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1(x)}{\tilde{E}_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad \text{III.47}$$

$$\varepsilon_2^N(x) = \frac{du_2^N(x)}{dx} = \frac{-y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2(x)}{E_2 A_2} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad \text{III.48}$$

Notant que les facteurs de correction de cisaillement employés sont fixés à 1/3 et 1/3, ce qui s'écarte des coefficients utilisés par Tounsi, Hassaine Daouadji [181].

III.4.1. Distribution des contraintes de cisaillement au long de l'interface FRP-Poutre

L'équation différentielle régissant la contrainte de cisaillement interfaciale est exprimée comme suit :

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - K_1 b_2 \left(\frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{\tilde{E}_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{\tilde{E}_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{y_1 + y_2}{\tilde{E}_1 I_1 + E_2 I_2} \right) V_T(x) = 0 \quad \text{III.49}$$

$$\text{Où} \quad K_1 = \frac{1}{\left(\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_1}{3G_1} + \frac{t_2}{3G_2} \right)} \quad \text{III.50}$$

Pour des raisons de simplicité, les solutions générales fournies ci-dessous sont limitées à des uniformément réparties sur la portée de la poutre. Dans de telles conditions de chargement, $d^2V_T(x)/dx^2 = 0$, et la solution générale de l'équation (III.49) s'exprime comme suit :

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad \text{III.51}$$

Où

$$\lambda^2 = K_1 b_2 \left(\frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{\tilde{E}_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{\tilde{E}_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \quad \text{III.52}$$

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{y_1 + y_2}{\tilde{E}_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad \text{III.53}$$

B1 et B2 sont des coefficients constants déterminés à partir des conditions aux limites. La présente étude porte sur une poutre à appui simple soumise à une charge uniformément répartie. La contrainte de cisaillement interfaciale pour cette charge en tout point est exprimée comme suit :

$$\tau(x) = \left[\frac{m_2 a}{2} (L - a) - m_1 \right] \frac{q e^{-\lambda x}}{\lambda} + m_1 q \left(\frac{L}{2} - a - x \right) \quad 0 \leq x \leq L_p \quad \text{III.54}$$

Où

$$m_2 = \frac{K_1 y_1}{\tilde{E}_1 I_1} \quad \text{III.55}$$

III.4.2. Distribution de la contrainte normale au long de l'interface FRP-Poutre :

L'équation différentielle la contrainte normale interfaciale est exprimée comme suit :

$$\frac{d^4\sigma_n(x)}{dx^4} + \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{1}{\tilde{E}_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right) \sigma_n(x) + \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{y_1}{\tilde{E}_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q E_a}{t_a \tilde{E}_1 I_1} = 0 \quad \text{III.56}$$

La solution générale de cette équation différentielle du quatrième ordre est :

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad \text{III.57}$$

Pour de grandes valeurs de x , on suppose que la contrainte normale s'approche de zéro, ce qui donne $C_3 = C_4 = 0$. Par conséquent, la solution générale devient :

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad \text{III.58}$$

Où

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_a b_2}{4 t_a} \left(\frac{1}{\tilde{E}_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right)} \quad \text{III.59}$$

$$n_1 = \left(\frac{y_1 E_2 I_2 - y_2 \tilde{E}_1 I_1}{\tilde{E}_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad \text{III.60}$$

$$n_2 = \frac{E_2 I_2}{b_2 (\tilde{E}_1 I_1 + E_2 I_2)} \quad \text{III.61}$$

C_1 et C_2 sont des coefficients constants déterminés à partir des conditions aux limites.

$$C_1 = \frac{E_a}{2\beta^3 t_a \tilde{E}_1 I_1} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad \text{III.62}$$

$$C_2 = -\frac{E_a}{2\beta^2 t_a \tilde{E}_1 I_1} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad \text{III.63}$$

Où

$$n_3 = \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{y_1}{\tilde{E}_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \quad \text{III.64}$$

III.5. Résultats et discussions

III.5.1. Études comparatives (Validation)

Cette section présente la validation de la méthode proposée pour prédire les contraintes interfaciales dans les poutres en béton armé endommagées renforcées par des plaques de FRP (polymère renforcé par des fibres) hélicoïdales bio-inspirées. Le processus de validation utilise un modèle analytique.

Plusieurs études de cas sont examinées pour évaluer l'efficacité du modèle analytique dans la prédiction des contraintes interfaciales. Le système de matériaux étudié comprend une poutre en béton armé renforcée par une plaque FRP hélicoïdale. Le tableau III.2 résume les matériaux utilisés pour la validation et l'étude paramétrique ultérieure.

Un exemple spécifique considère une poutre en béton armé avec une longueur de 3000 mm, une distance de 300 mm entre le support et l'extrémité de la plaque, et une charge uniformément répartie (UDL) de 50 kN/m. Avec trois étapes de charge appliquée différente :

- Phase 1 : Charge mécanique ($Q = 50 \text{ kN/m}$) ;
- Phase 2 : Charge mécanique ($Q = 50 \text{ kN/m}$), charge thermique ($\Delta T = 50^\circ\text{C}$) ;
- Phase 3 : Charge mécanique ($Q = 50 \text{ kN/m}$), charge hygrothermique ($\Delta T = 50^\circ\text{C}$, $\Delta C = 01\%$).

Tableau III.2 : Propriétés géométriques et matérielles de la poutre renforcée

Éléments	Matériau	b_i (mm)	t_i (mm)	E_{11} (MPa)	E_{22} (MPa)	ν_i	G_i (MPa)	α_i	β_i
Poutre	Béton	200	300	30000	30000	0.18	-	11×10^{-6}	3×10^{-4}
Adhésif	Résine époxy	200	4	3000	3000	0.35	-	-	-
Plaque de renforcement	C-FRP	200	4	140000	10000	0.28	5000	9×10^{-6}	1.89×10^{-3}

Les résultats présentés dans les tableaux III.3 et III.4 analysent le comportement des poutres en béton armé collées avec des feuilles de polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP) dans différentes conditions de chargement, qui comprennent des charges mécaniques, thermiques et hygrothermiques. Le tableau III.3 compare les contraintes normales et de cisaillement maximales à l'interface entre Antar, Amara [177] et le présent modèle [0/90].

Tableau III.3 : Contraintes interfaciales d'une poutre en béton armé renforcée avec une plaque en CFRP

Modèle	Phase 1		Phase 2		Phase 3	
	Cisaillement	Normal	Cisaillement	Normal	Cisaillement	Normal
Antar, Amara [177]	2.102	1.002	2.959	1.392	2.823	1.330
Modèle actuel [0/90]_s	1.337	0.682	1.856	0.931	1.773	0.891

Les résultats indiquent que le présent modèle présente des contraintes normales et de cisaillement maximales inférieures à tous les stades par rapport à Antar et al. Cela suggère que le présent modèle offre potentiellement une meilleure répartition des contraintes et des concentrations de contraintes réduites.

Le tableau III.4 présente une comparaison des contraintes normales et de cisaillement à l'interface entre les modèles de Daouadji, Rabahi [176], Rabahi, Benferhat [182] et le présent modèle sous des charges uniformément réparties. Les résultats montrent que le modèle actuel se situe généralement dans la fourchette des autres modèles, mais tend à avoir des contraintes normales et de cisaillement légèrement plus élevées ou comparables, en particulier aux phases 2 et 3. Cela signifie que le modèle actuel est en accord étroit avec les autres modèles en termes de contraintes de cisaillement et normales, en particulier sous des charges thermiques et hygrothermiques (phase 2 et phase 3). Cette cohérence entre les tableaux renforce la validité et

la robustesse du modèle actuel pour prédire le comportement des contraintes dans diverses conditions environnementales.

Tableau III.4 : Comparaison des contraintes interfaciales d'une poutre en béton armé renforcée avec une plaque en CFRP soumises à différents Chargeements

Poutre en BA ($\varphi=0$) collée à une plaque en CFRP						
Modèle	Phase 1		Phase 2		Phase 3	
	Cisaillement	Normal	Cisaillement	Normal	Cisaillement	Normal
Daouadji, Rabahi [176]	1.998	1.1887	2.759	1.618	2.638	1.549
Rabahi, Benferhat [182]	1.812	1.0893	2.491	1.474	2.383	1.413
Modèle actuel	1.962	1.169	2.706	1.590	2.588	1.523

Poutre BA endommagée ($\varphi=0,3$) collée à une plaque CFRP						
Modèle	Phase 1		Phase 2		Phase 3	
	Cisaillement	Normal	Cisaillement	Cisaillement	Normal	Cisaillement
Daouadji, Rabahi [176]	2.408	1.451	3.041	1.810	2.941	1.753
Rabahi, Benferhat [182]	2.173	1.324	2.734	1.644	2.645	1.593
Modèle actuel	2.376	1.433	2.999	1.787	2.900	1.731

III.5.2. Etude paramétrique

Dans cette partie, plusieurs paramètres ont été variés en vue de voir leurs effets sur le comportement de l'interface d'une poutre renforcée. Les tableaux III.5, III.6 et III.7 englobe des résultats globaux de ces contraintes d'interfaces en variant les différents modules de Young des différents constituants du système de renforcement (poutre, plaque), leurs épaisseurs, type de chargement, coefficient d'endommagement etc.

Le Tableau III.5 présente les contraintes de cisaillement interfaciales (τ) et les contraintes normales (σ) pour une poutre en béton armé (BA) renforcée avec une plaque en polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP). Les résultats sont présentés pour différentes valeurs du module d'élasticité (E_{f11}) et différents types de la plaque (HR, HE, HS) sous trois étapes de charge appliquées.

D'après les résultats de ce tableau, il peut être observé que pour les deux cas de E_{f11} , à mesure que l'épaisseur de la plaque de renforcement (t_f) augmente, les contraintes de cisaillement interfaciales (τ) et les contraintes normales (σ) ont tendance à augmenter. En comparant également les résultats pour les trois conceptions bio-inspirées considérées pour les plaques composites laminées hélicoïdales (HR, HE, HS), des variations dans les valeurs de contrainte

peuvent être observées, indiquant l'effet des différentes conceptions sur les contraintes interfaciales. De plus, il est clair que lorsque le module de Young de la plaque (E_{f11}) passe de 100000 à 140000 MPa, les contraintes interfaciales (à la fois de cisaillement et normales) ont tendance à augmenter pour tous les types de plaque et tous les niveaux de charge.

Tableau III.5 : Effet de la variation du module de Young de la plaque de renfort CFRP sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA endommagée et renforcée ($\phi = 0,3$, Phase 3)

t_f	N	$E_{f11} = 100000 \text{ MPa}$						$E_{f11} = 140000 \text{ MPa}$					
		HR		HE		HS		HR		HE		HS	
		τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
4	12	2.297	1.237	2.148	1.195	1.245	0.777	2.652	1.323	2.472	1.277	1.406	0.820
	16	2.201	1.188	1.953	1.127	1.179	0.758	2.536	1.268	2.261	1.211	1.321	0.796
	20	2.048	1.111	1.790	1.067	1.144	0.750	2.356	1.185	2.070	1.148	1.276	0.785
	24	1.923	1.051	1.886	1.111	1.124	0.746	2.219	1.126	2.183	1.196	1.250	0.780
	28	1.835	1.013	1.881	1.114	1.102	0.740	2.121	1.088	2.176	1.198	1.223	0.772
6	12	2.715	1.629	2.552	1.581	1.513	1.052	3.092	1.721	2.903	1.673	1.704	1.109
	16	2.610	1.571	2.334	1.499	1.435	1.027	2.971	1.659	2.675	1.598	1.604	1.077
	20	2.441	1.477	2.149	1.426	1.392	1.015	2.778	1.561	2.465	1.523	1.550	1.062
	24	2.300	1.403	2.259	1.481	1.369	1.010	2.630	1.490	2.590	1.581	1.520	1.055
	28	2.201	1.355	2.253	1.484	1.343	1.002	2.522	1.445	2.583	1.584	1.487	1.045
8	12	3.020	1.962	2.852	1.912	1.730	1.301	3.401	2.052	3.211	2.005	1.941	1.369
	16	2.912	1.898	2.624	1.822	1.642	1.271	3.280	1.986	2.980	1.927	1.831	1.332
	20	2.736	1.793	2.427	1.740	1.594	1.257	3.085	1.881	2.761	1.846	1.771	1.314
	24	2.588	1.710	2.543	1.803	1.567	1.250	2.932	1.804	2.891	1.910	1.737	1.305
	28	2.482	1.656	2.538	1.807	1.539	1.241	2.821	1.754	2.884	1.914	1.700	1.293
10	12	3.253	2.253	3.084	2.203	1.912	1.532	3.627	2.337	3.442	2.293	2.138	1.609
	16	3.145	2.185	2.852	2.109	1.816	1.497	3.509	2.269	3.213	2.215	2.020	1.567
	20	2.967	2.074	2.650	2.022	1.765	1.481	3.318	2.161	2.993	2.132	1.956	1.546
	24	2.816	1.985	2.770	2.090	1.736	1.473	3.165	2.081	3.124	2.199	1.919	1.536
	28	2.706	1.927	2.764	2.094	1.704	1.462	3.053	2.029	3.117	2.204	1.879	1.522

Tableau III.6 : Contraintes d'interfaces d'une poutre en BA endommagée ($\phi = 0,3$) renforcée par une plaque en CFRP et soumise à différents types de charges

t _f	N	Phase 1						Phase 2						Phase 3					
		HR		HE		HS		HR		HE		HS		HR		HE		HS	
		τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
4	12	2.177	1.097	2.025	1.057	1.138	0.672	2.742	1.365	2.556	1.319	1.456	0.848	2.652	1.323	2.471	1.277	1.406	0.820
	16	2.079	1.051	1.848	1.000	1.069	0.652	2.623	1.309	2.339	1.251	1.369	0.824	2.536	1.268	2.261	1.211	1.321	0.796
	20	1.928	0.980	1.689	0.946	1.032	0.642	2.437	1.223	2.142	1.186	1.322	0.812	2.356	1.185	2.070	1.148	1.276	0.785
	24	1.813	0.931	1.783	0.986	1.011	0.637	2.295	1.163	2.258	1.235	1.296	0.806	2.219	1.126	2.183	1.196	1.250	0.780
	28	1.732	0.899	1.778	0.988	0.988	0.630	2.195	1.124	2.252	1.238	1.267	0.799	2.121	1.088	2.176	1.198	1.223	0.772
6	12	2.549	1.439	2.389	1.395	1.385	0.916	3.195	1.775	3.000	1.725	1.764	1.145	3.092	1.721	2.903	1.673	1.704	1.109
	16	2.447	1.386	2.197	1.329	1.303	0.888	3.070	1.710	2.766	1.648	1.661	1.113	2.971	1.659	2.675	1.598	1.604	1.077
	20	2.284	1.302	2.020	1.264	1.258	0.875	2.872	1.609	2.549	1.572	1.605	1.098	2.778	1.561	2.465	1.523	1.550	1.062
	24	2.159	1.243	2.125	1.314	1.233	0.868	2.719	1.537	2.678	1.631	1.574	1.090	2.630	1.490	2.590	1.581	1.520	1.055
	28	2.069	1.204	2.119	1.316	1.206	0.860	2.608	1.491	2.670	1.634	1.540	1.080	2.522	1.445	2.583	1.584	1.487	1.045
8	12	2.812	1.727	2.651	1.684	1.583	1.139	3.512	2.114	3.317	2.066	2.009	1.413	3.401	2.052	3.211	2.005	1.941	1.369
	16	2.709	1.671	2.455	1.614	1.491	1.105	3.388	2.046	3.079	1.986	1.895	1.375	3.280	1.986	2.980	1.927	1.831	1.332
	20	2.544	1.581	2.271	1.543	1.442	1.089	3.187	1.937	2.854	1.904	1.833	1.356	3.085	1.881	2.761	1.846	1.771	1.314
	24	2.415	1.515	2.381	1.598	1.413	1.081	3.030	1.859	2.988	1.969	1.798	1.347	2.932	1.804	2.891	1.910	1.737	1.305
	28	2.321	1.472	2.374	1.601	1.383	1.070	2.916	1.808	2.980	1.973	1.760	1.335	2.821	1.754	2.884	1.914	1.700	1.293
10	12	3.006	1.979	2.849	1.937	1.748	1.346	3.744	2.405	3.554	2.360	2.212	1.659	3.627	2.337	3.442	2.293	2.138	1.609
	16	2.906	1.921	2.654	1.866	1.650	1.308	3.623	2.335	3.318	2.281	2.090	1.616	3.509	2.269	3.213	2.215	2.020	1.567
	20	2.743	1.827	2.468	1.792	1.596	1.289	3.426	2.224	3.092	2.197	2.024	1.595	3.318	2.161	2.993	2.132	1.956	1.546
	24	2.614	1.758	2.579	1.850	1.565	1.280	3.270	2.142	3.227	2.265	1.986	1.585	3.165	2.081	3.124	2.199	1.919	1.536
	28	2.519	1.713	2.573	1.853	1.532	1.267	3.154	2.089	3.220	2.270	1.945	1.570	3.053	2.029	3.117	2.204	1.879	1.522

Les résultats présentés dans le tableau III.6 illustrent les contraintes interfaciales dans les poutres en béton armé endommagées renforcées par une plaque en CFRP, soumises à différentes conditions de charge. Les données sont classées en trois étapes : Phase 1 (charge mécanique de 50 kN/m), Phase 2 (charge mécanique de 50 kN/m et charge thermique de $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$), et Phase 3 (charge mécanique de 50 kN/m, charge thermique de $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$, et charge hygrothermique de $\Delta C = 01\%$). Le tableau différencie en outre les effets de trois conceptions bio-inspirées pour les plaques composites stratifiées hélicoïdales : Hélicoïdal-récurrent (HR), Hélicoïdal-exponentielle (HE) et Hélicoïdal-sémi-circulaire (HS).

À tous les phases, on observe que lorsque l'épaisseur de la plaque (t_f) augmente, la contrainte de cisaillement interfaciale (τ) et la contrainte normale (σ) augmentent également, en outre, nous constatons que la contrainte de cisaillement interfaciale (τ) et la contrainte normale (σ) diminuent toutes deux à mesure que le nombre de couches (N) augmente. Cette tendance est cohérente pour toutes les conceptions et conditions de charge. En comparant les conceptions, la conception HS présente systématiquement des contraintes interfaciales plus faibles que les conceptions HE et HR, ce qui indique une meilleure performance dans les conditions données. La conception HE présente des valeurs de contraintes intermédiaires, tandis que la conception HR présente les contraintes les plus élevées, ce qui suggère qu'elle peut être moins efficace pour minimiser les contraintes interfaciales.

Une observation remarquable des données est que la phase 3 n'entraîne pas toujours des contraintes interfaciales plus élevées que la phase 2, bien qu'elle soit soumise à une charge hygrothermique supplémentaire. Dans plusieurs cas, les contraintes de la phase 3 sont en fait inférieures à celles de la phase 2. Ce résultat suggère que les effets combinés des charges mécaniques, thermiques et hygrothermiques à la phase 3 pourraient conduire à une interaction plus complexe à l'interface des matériaux, ce qui pourrait potentiellement redistribuer ou même réduire les contraintes interfaciales globales par rapport au scénario de la phase 2. En général, les résultats suggèrent que la conception HS est la plus efficace pour diminuer les contraintes interfaciales, en particulier lorsqu'il s'agit de régimes de charge complexes. Il est essentiel de déterminer la conception de l'armature et les caractéristiques des matériaux pour maximiser les performances et la longévité des poutres en béton armé soumises à différentes contraintes environnementales et mécaniques.

Tableau III.7 : Effet de la variation du module de Young du béton sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA endommagée et renforcée par une plaque CFRP (N = 28)

Phase	ϕ	$E_{b11} = 20000 \text{ MPa}$						$E_{b11} = 30000 \text{ MPa}$						$E_{b11} = 50000 \text{ MPa}$					
		HR		HE		HS		HR		HE		HS		HR		HE		HS	
		τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
1	0	1.783	0.927	1.830	1.019	1.020	0.652	1.381	0.708	1.419	0.781	0.776	0.488	0.963	0.486	0.991	0.538	0.534	0.329
	0.1	1.898	0.990	1.946	1.087	1.091	0.701	1.480	0.761	1.520	0.839	0.835	0.527	1.041	0.527	1.071	0.583	0.578	0.358
	0.2	2.029	1.064	2.080	1.166	1.175	0.759	1.595	0.824	1.638	0.907	0.904	0.574	1.133	0.576	1.165	0.636	0.631	0.392
	0.3	2.183	1.151	2.236	1.260	1.275	0.829	1.732	0.899	1.778	0.988	0.988	0.630	1.244	0.634	1.279	0.701	0.695	0.435
	0.4	2.366	1.256	2.422	1.372	1.398	0.915	1.898	0.990	1.946	1.087	1.091	0.701	1.381	0.708	1.419	0.781	0.776	0.488
2	0	2.237	1.147	2.294	1.264	1.294	0.818	1.914	0.965	1.966	1.067	1.092	0.676	1.591	0.787	1.636	0.874	0.900	0.545
	0.1	2.330	1.201	2.389	1.321	1.354	0.860	1.992	1.009	2.045	1.115	1.140	0.710	1.650	0.819	1.696	0.909	0.934	0.568
	0.2	2.438	1.264	2.499	1.388	1.426	0.911	2.085	1.061	2.139	1.171	1.197	0.750	1.721	0.858	1.768	0.951	0.976	0.596
	0.3	2.566	1.338	2.628	1.467	1.513	0.973	2.195	1.124	2.252	1.238	1.267	0.799	1.807	0.906	1.856	1.003	1.027	0.632
	0.4	2.720	1.429	2.783	1.564	1.620	1.051	2.330	1.201	2.389	1.321	1.354	0.860	1.914	0.965	1.966	1.067	1.092	0.676
3	0	2.165	1.112	2.220	1.225	1.250	0.791	1.829	0.924	1.879	1.022	1.042	0.646	1.491	0.739	1.533	0.820	0.841	0.510
	0.1	2.261	1.167	2.318	1.284	1.313	0.835	1.911	0.970	1.962	1.071	1.091	0.681	1.554	0.773	1.597	0.857	0.878	0.535
	0.2	2.373	1.232	2.432	1.352	1.386	0.887	2.007	1.023	2.060	1.129	1.151	0.722	1.628	0.813	1.672	0.901	0.921	0.564
	0.3	2.505	1.308	2.566	1.434	1.475	0.950	2.121	1.088	2.176	1.198	1.223	0.772	1.717	0.863	1.764	0.955	0.974	0.600
	0.4	2.664	1.402	2.725	1.533	1.585	1.029	2.261	1.167	2.318	1.284	1.313	0.835	1.829	0.924	1.879	1.022	1.042	0.646

Le tableau III.7 illustre l'effet de la variation des modules de Young (E_{b11}) du béton armé (BA) sur les contraintes interfaciales dans une poutre en béton armé endommagée renforcée avec une plaque en composite CFRP. L'analyse est menée à travers trois phases de conditions de chargement, chaque phase examinant trois valeurs du module de Young ($E_{b11} = 20000$ MPa, 30000 MPa et 50000 MPa). Les résultats indiquent une diminution constante des contraintes de cisaillement interfaciales (τ) et des contraintes normales (σ) à mesure que le module de Young augmente, suggérant que des matériaux BA plus rigides conduisent à des distributions de contrainte plus favorables à l'interface. Parmi les trois conceptions bio-inspirées Hélicoïdal-Récurif (HR), Hélicoïdal-exponentielle (HE), et Hélicoïdal-Semi-circulaires (HS), la conception HS démontre constamment les contraintes interfaciales les plus basses, tandis que la conception HE montre les plus élevées, impliquant que la conception HS est la plus efficace pour atténuer les concentrations de contraintes. De plus, l'impact des phases de chargement montre que les contraintes interfaciales augmentent de la phase 1 (charge mécanique uniquement) à la phase 2 (charges mécaniques et thermiques), mais pas toujours de la phase 2 à la phase 3 (charges mécaniques, thermiques et hygrothermiques), indiquant des interactions complexes entre les charges et les propriétés des matériaux qui peuvent influencer la distribution des contraintes.

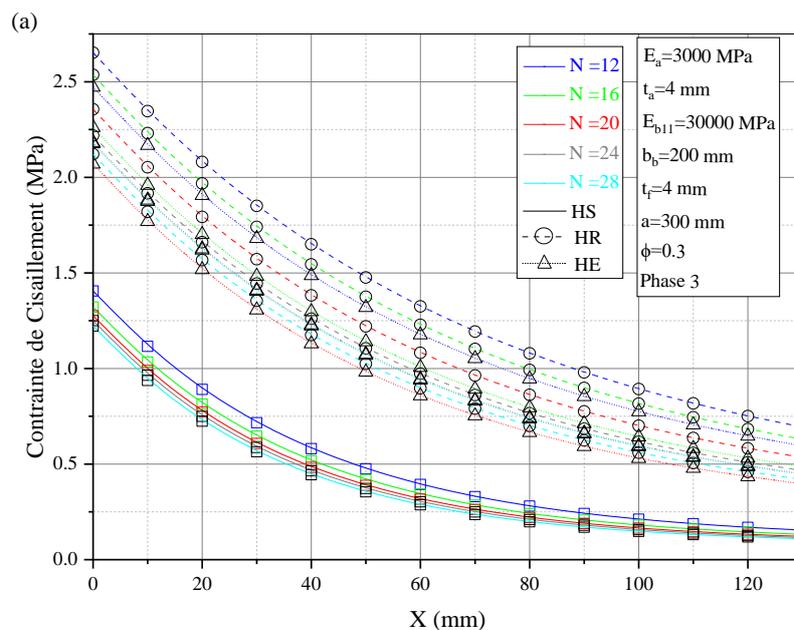
Dans ce qui suit, dans cette section, nous allons détailler tous les paramètres pour mieux appréhender le comportement de l'interface poutre-renfort en utilisant le nouveau matériau bio-inspiré.

III.5.2.1. Effet du nombre de couches de stratifié

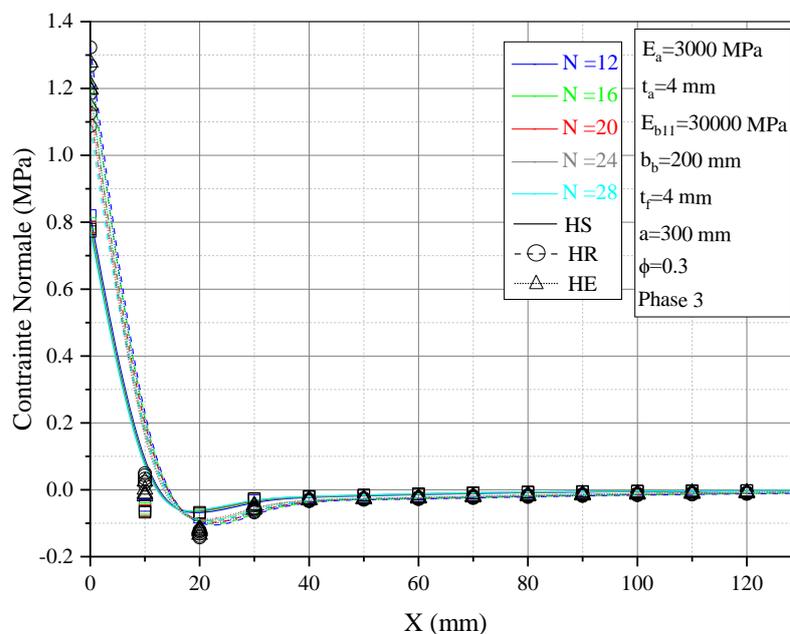
Les figures III.5a et III.5b montrent l'effet de la variation du nombre de couches de plaques de renforcement (N) sur les contraintes interfaciales pour les poutres en béton armé endommagées renforcées avec des plaques stratifiées en CFRP sous des conditions de charge hygrothermique (Phase 3).

La figure III.5a montre la variation de la contrainte de cisaillement ou long de la distance de l'extrémité de la plaque (X) pour différents nombres de couches (N = 12, 16, 20, 24, 28) et des conceptions bio-inspirées (HS, HR, HE). La contrainte de cisaillement diminue généralement à mesure que la distance depuis l'extrémité de la plaque augmente de l'arête vers le centre. Un nombre inférieur de couches (par exemple, N = 12) entraîne des contraintes de cisaillement plus élevées près des bords par rapport à un nombre plus élevé de couches (par exemple, N = 28). Parmi les conceptions, HR présente les valeurs de contrainte de cisaillement les plus élevées.

La figure III.5b montre la distribution de la contrainte normale ou long de la distance à l'extrémité de la plaque pour les mêmes conditions. La contrainte normale atteint un pic prononcé près du bord de la plaque et diminue rapidement plus loin. Le nombre de couches à un impact significatif sur la contrainte maximale, Moins de couches ($N = 12$) entraînant des contraintes normales maximales plus élevées. Les différences entre les conceptions (HS, HR, HE) sont minimales pour la contrainte normale, ce qui indique une réponse cohérente entre les conceptions.



(a) : Contrainte de Cisaillement

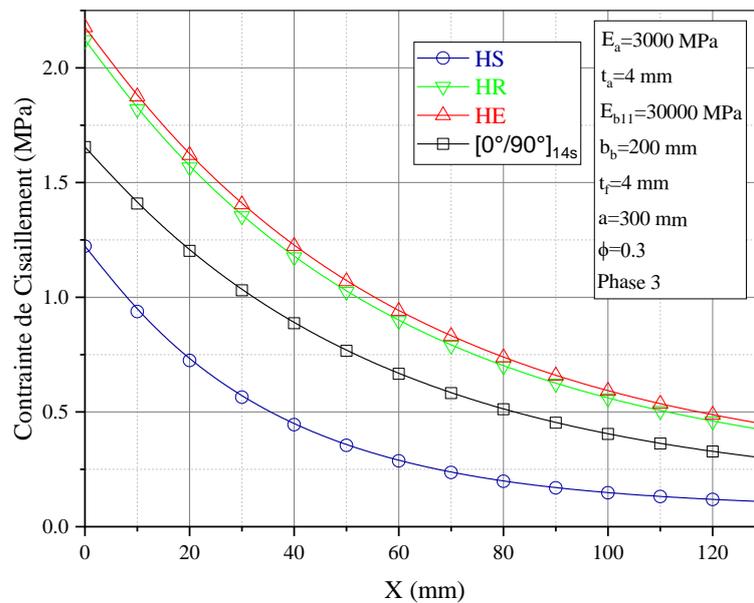


(b) : Contrainte Normale

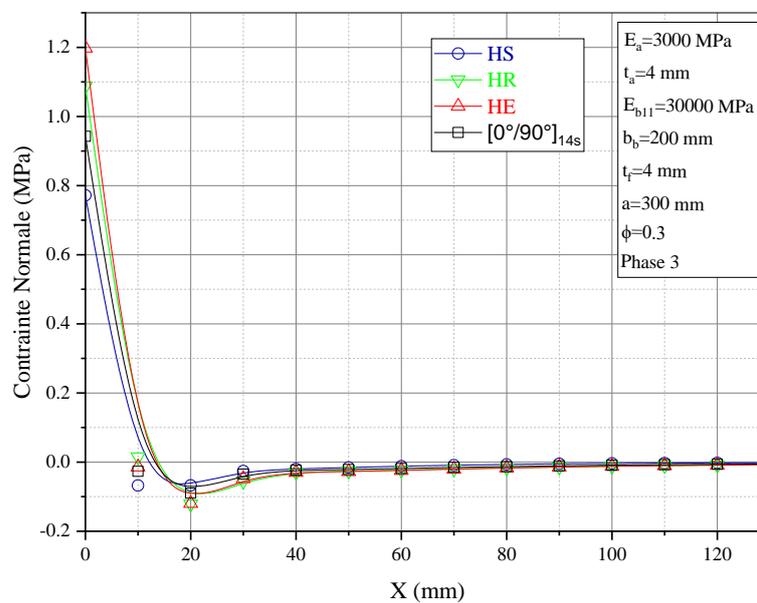
Figure III.5 : Effet de différents nombres de couches sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA renforcée et soumise aux charges combinées ($\phi = 0,3$, Phase 3)

III.5.2.2. Effet de l'orientation des fibres

Les figures III.6a et III.6b analysent l'impact des différentes orientations des fibres sur les contraintes interfaciales dans les poutres en béton armé endommagées renforcées par des plaques stratifiées en CFRP dans des conditions de chargement hygrothermiques (Phase 3), où X représente la distance d'extrémité de la plaque.



(a) : Contrainte de Cisaillement



(b) : Contrainte Normale

Figure III.6 : Effet de l'orientation des fibres sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA renforcée et soumise aux charges combinées ($N=28$, $\phi=0,3$, Phase 3)

La figure III.6a montre la variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la distance d'extrémité de la plaque pour différentes orientations de fibres (HS, HR, HE et

$[0^\circ/90^\circ]_{14s}$). La contrainte de cisaillement diminue à mesure que X augmente à partir de l'extrémité de la plaque. Parmi les conceptions, Hélicoïdal-Exponentiel (HE) et Hélicoïdal-Récurif (HR) ont des contraintes de cisaillement initiales plus élevées, HE ayant les valeurs les plus élevées. L'orientation standard $[0^\circ/90^\circ]_{14s}$ et la conception HS présentent les contraintes de cisaillement les plus faibles, ce qui indique une meilleure répartition des contraintes de cisaillement par rapport aux conceptions bio-inspirées.

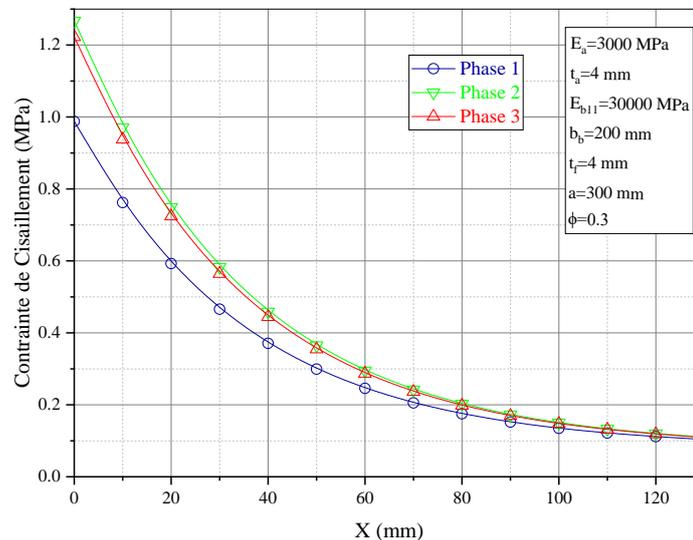
La figure III.6b montre la distribution de la contrainte normale le long de la distance à l'extrémité de la plaque dans les mêmes conditions. La contrainte normale atteint son maximum près de l'extrémité de la plaque et diminue rapidement à mesure que l'on s'approche de l'extrémité de la plaque (X augmente). Comme pour la contrainte de cisaillement, le modèle HE présente le pic de contrainte normale le plus élevé, suivi du modèle HR, puis de l'orientation standard $[0^\circ/90^\circ]_{14s}$, le modèle HS présentant le pic de contrainte normale le plus bas. Cela suggère que si les conceptions bio-inspirées peuvent augmenter les contraintes interfaciales initiales, l'orientation traditionnelle $[0^\circ/90^\circ]_{14s}$ et la conception HS offrent une distribution des contraintes plus uniforme et potentiellement plus durable.

III.5.2.3. Effet de la nature du chargement appliqué

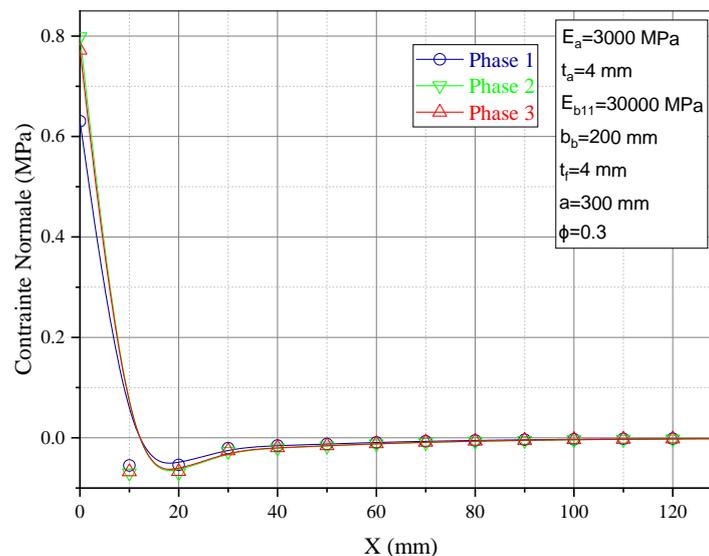
Les figures III.7a et III.7b illustrent l'effet de différentes phases de chargement sur les contraintes d'interface dans les poutres en béton armé endommagées renforcées par des plaques stratifiées en CFRP utilisant la conception bio-inspirée hélicoïdale-semi-circulaire (HS), avec un nombre de couches égal à 28, où 'X' représente la distance à partir de l'extrémité de la plaque.

La figure III.7a montre la variation de la contrainte de cisaillement sur la longueur de la poutre pour trois phases : charge mécanique (phase 1), charge mécanique et thermique (phase 2), et charge mécanique et hygrothermique (phase 3). Les courbes de cette figure montrent que la contrainte de cisaillement diminue avec l'augmentation de X pour toutes les étapes et que la contrainte de cisaillement la plus élevée est observée à la phase 2, ce qui indique que la charge thermique augmente la contrainte de cisaillement de manière significative. En outre, la phase 3 présente une contrainte de cisaillement plus élevée que la phase 1, mais plus faible que l'étape 2, ce résultat suggère que les effets combinés des charges mécaniques, thermiques et hygrothermiques à la phase 3 pourraient conduire à une interaction plus complexe à l'interface des matériaux, ce qui pourrait potentiellement redistribuer ou même réduire les contraintes interfaciales globales par rapport au scénario de la phase 2.

La figure III.7b montre la distribution de la contrainte normale sur la longueur de la poutre pour les trois mêmes phases. La contrainte normale atteint son maximum près de l'extrémité de la plaque et diminue rapidement. La phase 2 présente le pic de contrainte normale le plus élevé, suivi de la phase 3, et le plus faible est observé à la phase 1.



(a): Contrainte de Cisaillement



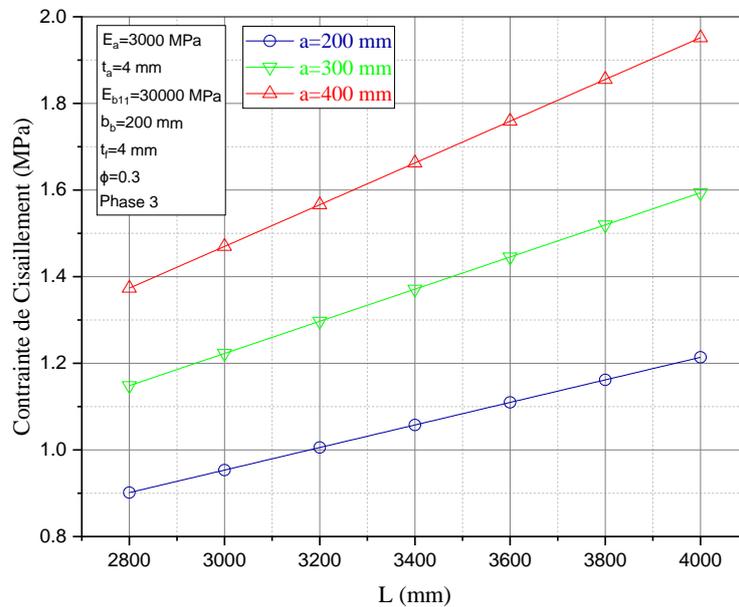
(b): Contrainte Normale

Figure III.7 : Effet de la variation du type de chargement sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA renforcée (HS, N=28, $\phi = 0,3$)

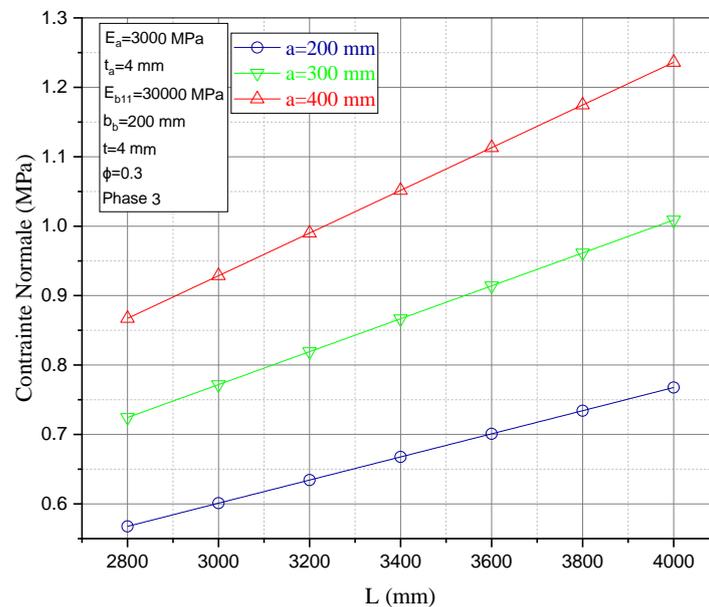
III.5.2.4. Effet de la longueur de la poutre en BA

L'influence de la longueur de la poutre en béton armé (L) sur les contraintes interfaciales pour les poutres en béton armé endommagées renforcées avec des plaques stratifiées en CFRP est présentée dans les deux figures (III.8a et III.8b). Dans la figure 8a, qui représente la variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la longueur de la poutre (L), nous observons que

la contrainte de cisaillement augmente linéairement avec la distance "a" pour les trois cas du paramètre (200, 300 et 400 mm). En outre, le taux d'augmentation est plus élevé pour les valeurs plus importantes de 'a', a=400mm montrant la contrainte normale la plus élevée et a=200 la plus faible.



(a): Contrainte de Cisaillement



(b): Contrainte Normale

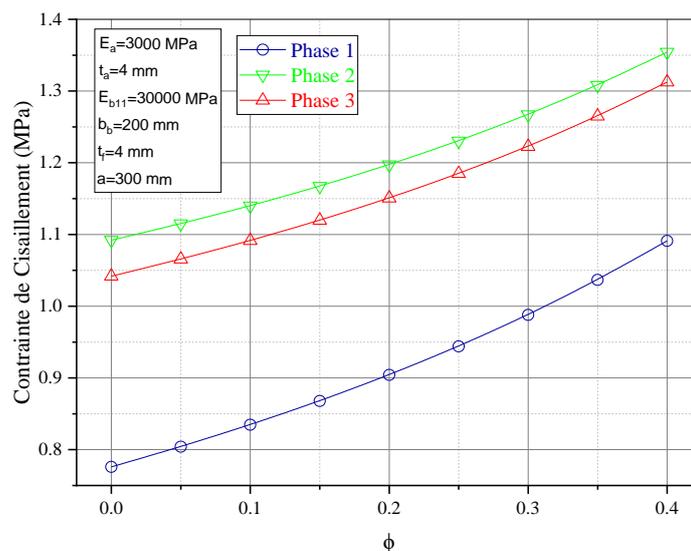
Figure III.8 : Effet de la longueur de la poutre en BA sur les contraintes interfaciales (HS, N=28, $\phi=0,3$, Phase 3)

De même, la figure III.8b montre la relation entre la contrainte normal et la longueur de la poutre (L). Cette figure montre que la contrainte normale augmente aussi linéairement avec la longueur de la poutre, en suivant la même tendance où des valeurs plus élevées de 'a'

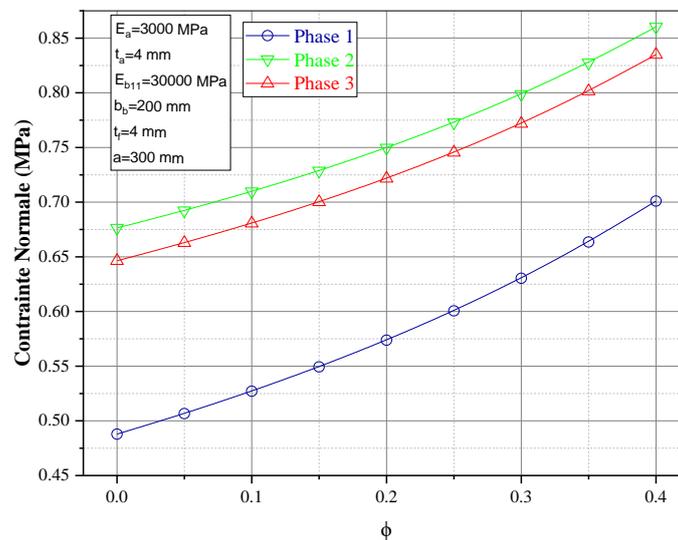
correspondent à des niveaux plus élevés de contrainte normale (pour $a=400\text{mm}$ la contrainte normale atteint jusqu'à 1.25 MPa , alors que pour $a=200\text{mm}$ elle atteint jusqu'à environ 0.8 MPa).

III.5.2.5. Effet de la variation du coefficient d'endommagement

Les deux figures (III.9a et III.9b) montrent l'influence du degré d'endommagement, indiqué par le coefficient (ϕ), sur les contraintes interfaciales dans une poutre en béton armé endommagée, renforcée par une plaque stratifiée en polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP), dans différentes conditions de chargement à travers trois phases.



(a): Conainte de Cisaillement



(b): Conainte Normale

Figure III.9 : Effet du degré d'endommagement à différentes phases sur les contraintes interfaciales (HS, N=28)

Dans la figure 9a, la contrainte de cisaillement augmente linéairement avec ϕ à tous les phases : La phase 1 (chargement mécanique seul) présente les valeurs de contrainte de

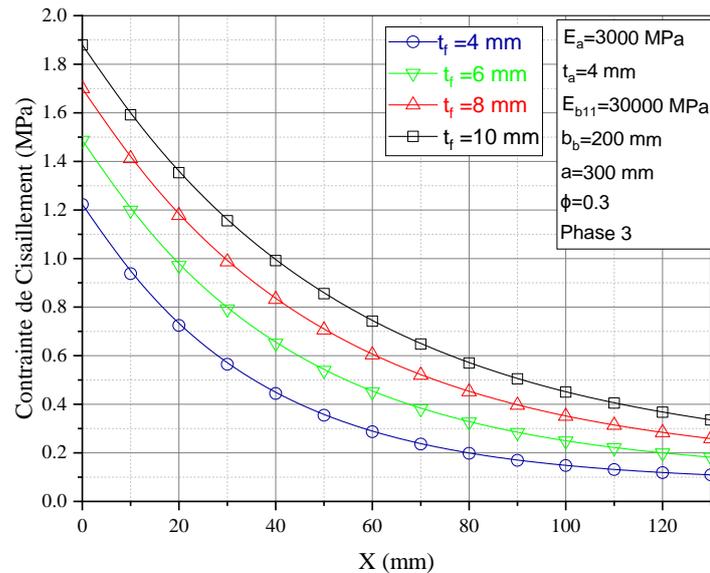
cisaillement les plus faibles (0,8-1,0 MPa), la phase 3 (chargement mécanique + hygrothermique) présente des valeurs plus élevées (1,05-1,3 MPa), et l'étape 2 (chargement mécanique + thermique) présente la contrainte de cisaillement la plus élevée (1,1-1,35 MPa).

Cette tendance indique l'influence significative des charges thermiques et hygrothermiques sur la distribution des contraintes de cisaillement. De manière similaire, la figure III.9b montre que la contrainte normale augmente également de manière linéaire avec ϕ : la phase 1 varie de 0,5 à 0,7 MPa, la phase 3 de 0,65 à 0,85 MPa, et la phase 2 de 0,7 à 0,9 MPa, ce qui indique l'impact considérable des charges mécaniques, thermiques et hygrothermiques combinées sur la distribution des contraintes normales.

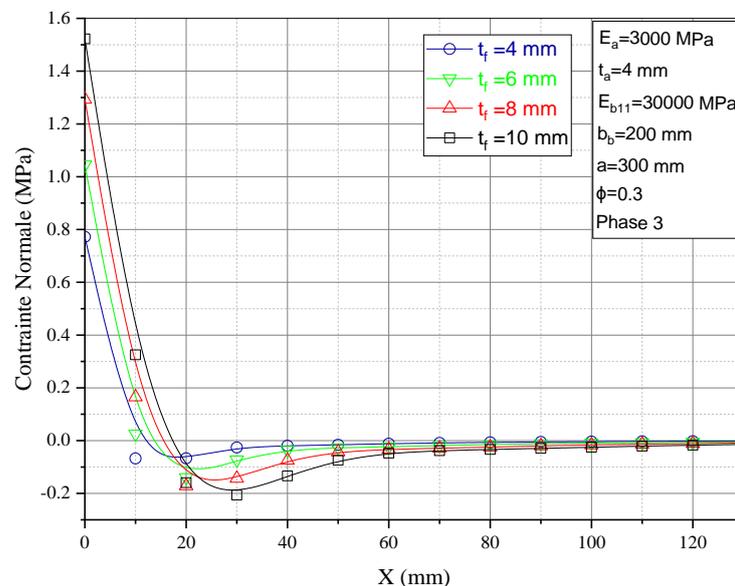
III.5.2.6. Effet de l'épaisseur de la plaque

L'effet de l'épaisseur de la plaque sur les contraintes interfaciales d'une poutre en béton armé (BA) endommagée renforcée avec une plaque laminée en polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP) est illustré dans les figures III.10. La figure III.10a indique que la contrainte de cisaillement diminue de manière exponentielle à mesure que la distance par rapport à l'extrémité de la poutre augmente, où les plaques plus minces ($t_f = 4$ mm) présentent une contrainte de cisaillement initiale plus faible que les plaques plus épaisses ($t_f = 6, 8$ et 10 mm). De plus, il est possible de constater que les plaques plus épaisses ont une contrainte de cisaillement initiale plus élevée. Dans la figure III.10b, la contrainte normale varie considérablement près de l'extrémité de la poutre et se stabilise le long de sa longueur, les plaques plus épaisses ayant une contrainte normale initiale plus élevée. Il y a également une diminution rapide de la contrainte normale dans les premiers 20 mm, suivie d'une stabilisation, ce qui suggère que, bien que les concentrations de contrainte initiales soient plus élevées pour les plaques plus épaisses, les contraintes s'équilibrent davantage le long de la poutre.

Ces courbes impliquent que les plaques plus épaisses sont plus efficaces pour supporter les charges initiales, mais finissent par distribuer les contraintes de manière homogène. Les résultats sont basés sur la phase 3, impliquant une charge mécanique ($Q = 50$ kN/m) et une charge hygrothermique ($\Delta T = 50$ °C, $\Delta C = 01\%$), soulignant l'importance de prendre en compte les charges mécaniques et environnementales combinées dans la conception des systèmes de renforcement en CFRP pour une performance optimale dans des conditions variables.



(a): Contrainte de Cisaillement



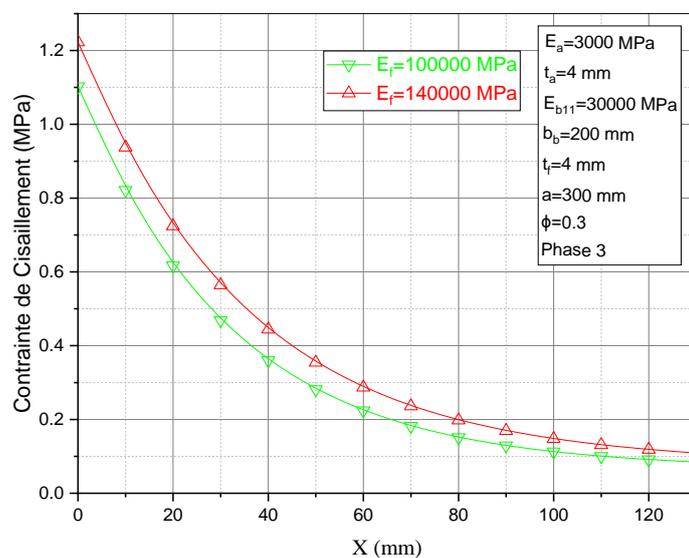
(b): Contrainte normale

Figure III.10 : Effet de l'épaisseur de la plaque sur les contraintes interfaciales (HS, $N=28$, $\phi =0,3$, Phase 3).

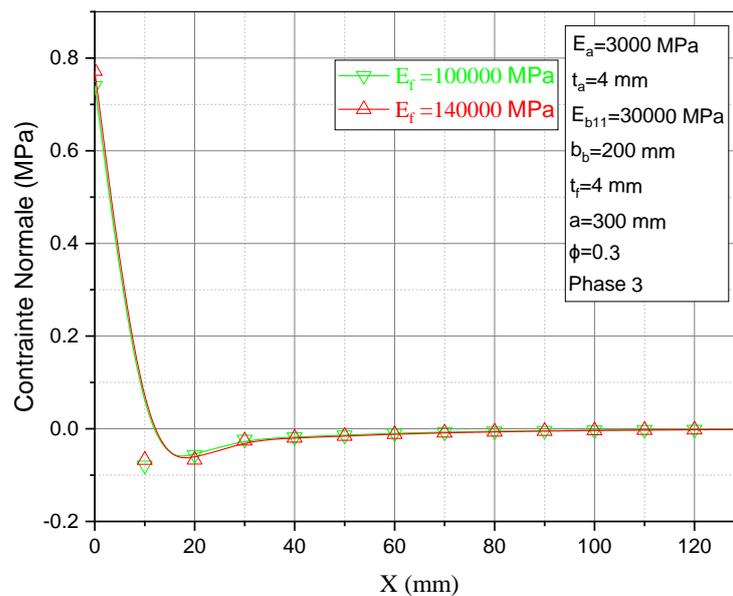
III.5.2.7. Effet du module d'Young de la plaque

Les deux figures (Figure III.11a et III.11b) illustrent l'effet du matériau de la plaque, indiqué par différentes valeurs du module de Young (E_f), sur les contraintes interfaciales dans une poutre en béton armé endommagée renforcée par une plaque stratifiée en CFRP dans des conditions de chargement de la phase 3. La figure III.11 a montre que la contrainte de cisaillement diminue exponentiellement sur la longueur de la poutre (la distance de l'extrémité de la plaque 'X') et varie avec E_f . Les plaques avec des valeurs E_f élevées (140 000 MPa) ont une contrainte de cisaillement initiale plus élevée (1,2 MPa) près de l'extrémité de la poutre que celles avec des

valeurs E_f faibles (100 000 MPa, 1,1 MPa). La contrainte de cisaillement diminue rapidement et se stabilise au-delà de 100 mm, ce qui indique que les plaques plus rigides supportent initialement des charges plus élevées mais répartissent la contrainte de manière similaire sur de plus grandes distances. La figure III.11b montre que la contrainte normale varie de manière significative près de l'extrémité de la poutre, des valeurs E_f plus élevées entraînant une contrainte normale initiale plus élevée (0,8 MPa pour 140 000 MPa). La contrainte normale diminue rapidement dans les 20 premiers mm et se stabilise près de zéro le long de l'extrémité de la plaque, ce qui indique que des valeurs E_f plus élevées entraînent des concentrations de contraintes initiales plus importantes qui s'égalisent ensuite le long de la poutre.



(a): Contraite de Cisaillement

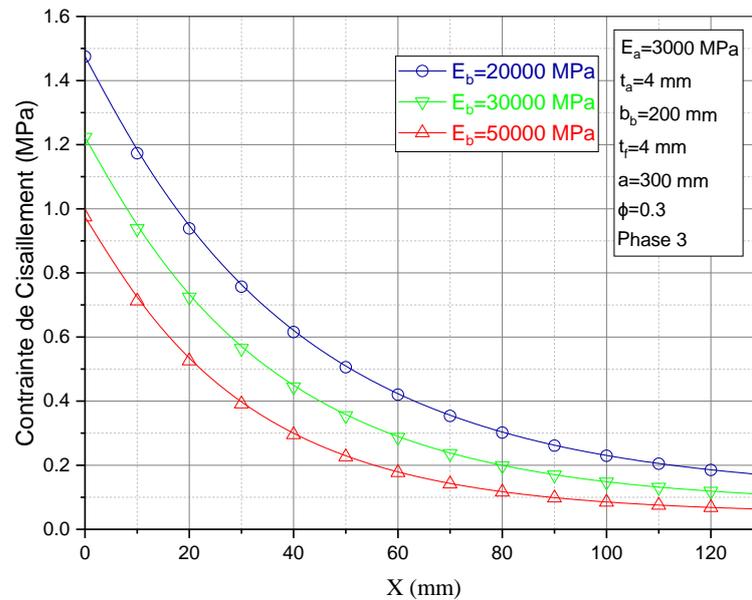


(b): Contraite normale

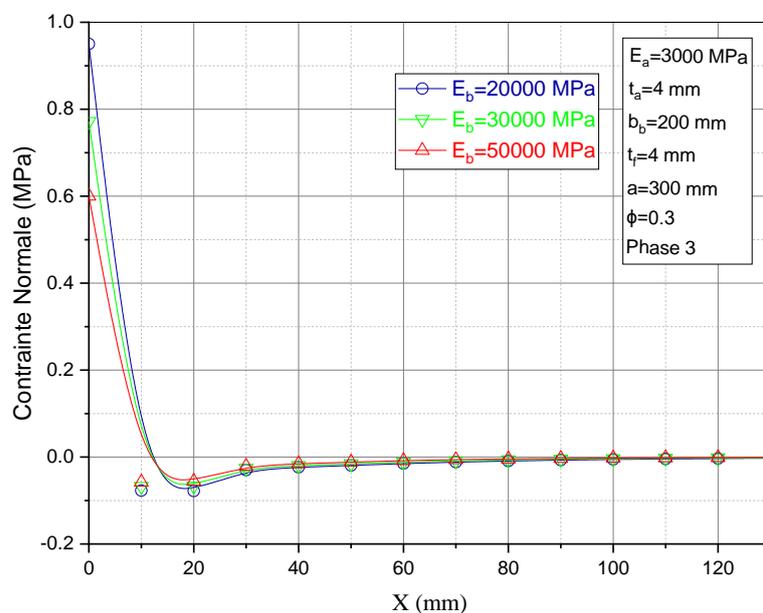
Figure III.11: Effet du module d'Young de la plaque sur les contraintes interfaciales (HS, N=28, Phase 3)

III.5.2.8. Effet du module d'Young de la poutre

Dans les deux figures (III.12a et III.12b), nous avons essayé d'analyser l'impact du module d'Young de la poutre (E_b) sur les contraintes d'interface dans une poutre en béton armé endommagée renforcée par une fine plaque stratifiée en CFRP dans des conditions de chargement de Phase 3, en présentant un modèle de conception hélicoïdal-sémi-circulaire (HS) bio-inspiré.



(a): Contrainte de Cisaillement



(b): Contrainte normale

Figure III.12 : Effet de module d'Young de la poutre sur les contraintes interfaciales (HS, N=28)

La figure III.12a montre que la contrainte de cisaillement diminue de manière exponentielle sur la longueur de la poutre (X) et varie avec la variation de E_b . Les poutres ayant des valeurs E_b

plus faibles (20 000 MPa) ont une contrainte de cisaillement initiale plus élevée près de l'extrémité de la poutre (1,5 MPa) par rapport à celles ayant des valeurs E_b plus élevées (50 000 MPa, 1,0 MPa). En outre, il est tout à fait remarquable qu'à mesure que la distance par rapport à l'extrémité de la plaque augmente, la contrainte de cisaillement diminue de manière significative, la différence entre les valeurs E_b devenant moins prononcée, ce qui indique que des valeurs E_b plus faibles se traduisent par une poutre en béton armé plus flexible avec des contraintes de cisaillement initiales plus élevées.

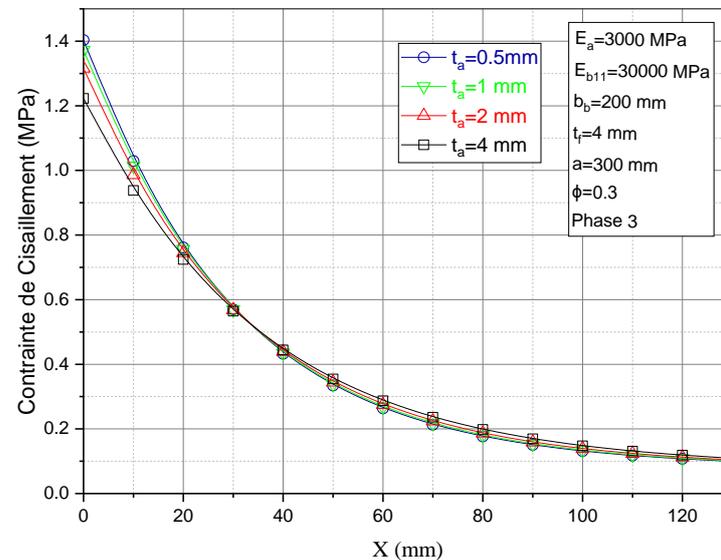
La figure III.12b indique que la contrainte normale varie de manière significative près de l'extrémité de la poutre, avec une contrainte normale initiale plus élevée pour les poutres ayant des valeurs E_b plus faibles (1,0 MPa pour 20 000 MPa contre 0,6 MPa pour 50 000 MPa). On constate également que la contrainte normale diminue rapidement dans les 20 premiers mm et se stabilise près de zéro sur toute la longueur de la poutre, ce qui indique que des valeurs E_b plus faibles entraînent des concentrations de contraintes initiales plus élevées qui s'égalisent ensuite le long de la poutre.

Ces observations suggèrent l'importance de prendre en compte le module de la poutre en béton armé lors de la conception, car des valeurs E_b plus faibles entraînent des contraintes interfaciales initiales plus élevées sous des charges mécaniques et hygrothermiques combinées, soulignant la nécessité d'une sélection appropriée des matériaux afin d'optimiser les performances structurelles.

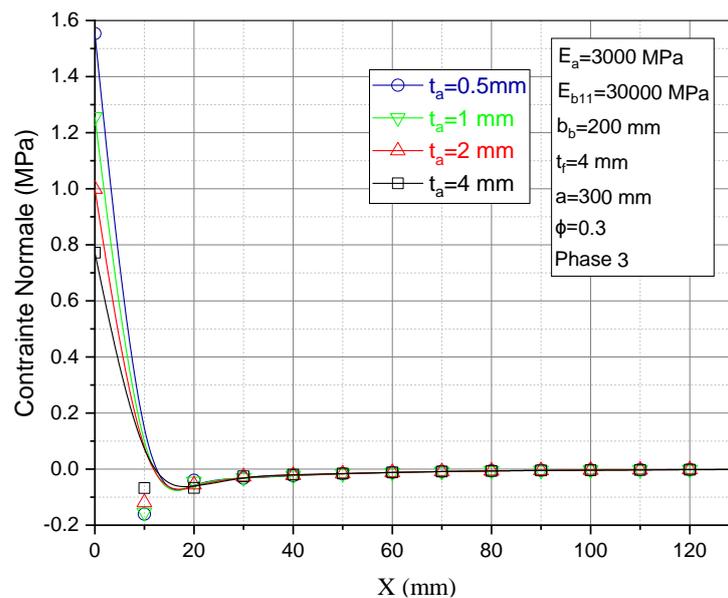
III.5.2.9. Effet de l'épaisseur de l'adhésif

Les figures III.13a et III.13b présentent les effets de l'épaisseur de l'adhésif (t_a) sur les contraintes interfaciales pour une poutre en béton armé (BA) endommagée renforcée avec une plaque mince stratifiée en utilisant une conception bio-inspirée hélicoïdale-sémi-circulaire (HS) dans des conditions de chargement de la phase 3 (charge mécanique $Q=50$ kN/m, charge hygrothermique $\Delta T=50^\circ\text{C}$, $\Delta C=01\%$). Dans la figure III.13a, la contrainte de cisaillement diminue fortement lorsque la distance par rapport à l'extrémité de la plaque (X) augmente, les adhésifs plus épais (4 mm) présentant une réduction plus prononcée par rapport aux adhésifs plus minces (0,5 mm). De même, la figure III.13b montre que la contrainte normale diminue rapidement avec la distance, se stabilisant au-delà de 40 mm, les adhésifs plus épais présentant à nouveau une réduction plus importante de la contrainte. Cela indique que les couches d'adhésif plus épaisses répartissent et atténuent plus efficacement les contraintes maximales à l'interface,

améliorant ainsi les performances structurales globales sous des charges mécaniques et hygrothermiques combinées.



(a): Contrainte de Cisaillement

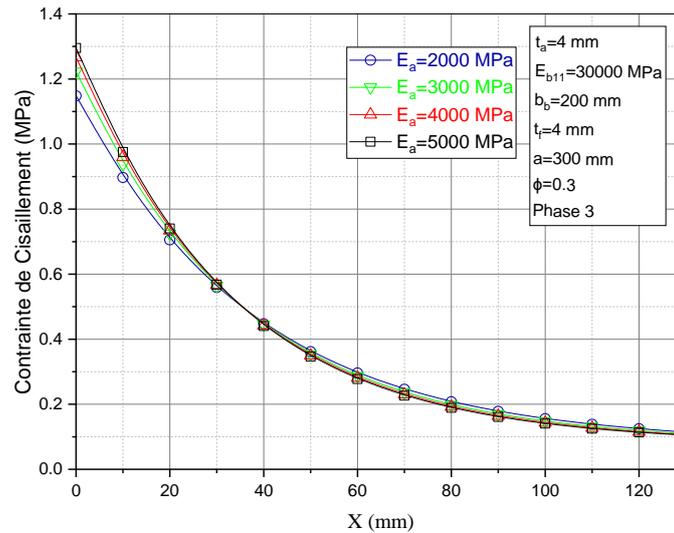


(b): Contrainte normale

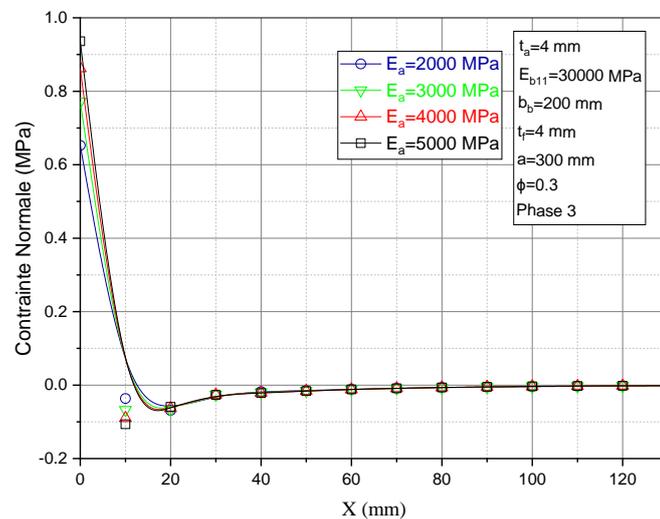
Figure III.13 : Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur les contraintes interfaciales (HS, N=28, $\phi = 0,3$, Phase 3)

III.5.2.10. Effet du module d'Young de l'adhésif

Les figures III.14a et III.14b illustrent l'effet du module de Young de l'adhésif (E_a) sur les contraintes interfaciales pour une poutre endommagée en béton armé (BA) renforcée par une fine plaque stratifiée utilisant une conception hélicoïdale-semi-circulaires (HS) bio-inspirée dans des conditions de chargement de la phase 3.



(a): Contrainte de Cisaillement



(b): Contrainte normale

Figure III.14 : Effet de module d'Young d'adhésion sur les contraintes interfaciales (HS, N=28, $\phi=0,3$, Phase 3)

Dans la figure III.14a, la contrainte de cisaillement diminue fortement avec l'augmentation de la distance (X) de l'extrémité de la plaque, avec des modules supérieurs ($E_a=5000$ MPa) montrant des contraintes initiales plus élevées mais des réductions plus importantes par rapport aux modules inférieurs ($E_a =2000$ MPa). La figure III.14b montre que la contrainte normale diminue également rapidement et se stabilise au-delà d'environ 20 mm, les modules d'adhésifs plus faibles entraînant des contraintes maximales légèrement plus faibles et une diminution plus progressive. Cela suggère que les adhésifs ayant des modules plus faibles (E_a) répartissent et réduisent mieux les contraintes interfaciales, améliorant ainsi l'intégrité structurelle de la poutre sous des charges mécaniques et hygrothermiques combinées.

III.6. Conclusions

Dans ce travail, nous avons tenté d'étudier l'impact de l'humidité et de la température (effets hygrothermiques) sur le comportement des poutres en béton armé endommagées, renforcées par des plaques composites stratifiées hélicoïdales bio-inspirées (BHLC). S'inspirant des principes de conception de la nature, les plaques BHLC offrent une nouvelle approche pour la réhabilitation structurelle. Une méthode analytique, basée sur la compatibilité des déformations et supposant des contraintes de cisaillement et normales constantes à travers la couche adhésive dans le cadre de l'élasticité linéaire est utilisée pour évaluer l'efficacité des plaques BHLC dans la limitation de la propagation des fissures. L'étude paramétrique révèle que la rigidité du stratifié et de l'adhésif, l'épaisseur de la plaque et la configuration de la couche hélicoïdale influencent considérablement les contraintes maximales à l'interface. Les principales conclusions sont :

- L'introduction des charges thermiques et hygrothermiques (phases 2 et 3) augmente les contraintes de cisaillement et normales à l'interface par rapport à une charge purement mécanique (phase 1), les contraintes les plus élevées étant observées dans des conditions thermiques à la phase 2 ;
- Les contraintes normales et de cisaillement augmentent avec la longueur de la poutre en béton armé et le paramètre « a », ce qui suggère que l'effet de renforcement des plaques stratifiées en CFRP est plus prononcé avec des longueurs de poutre plus importantes et des valeurs plus élevées de « a » ;
- L'augmentation du nombre de couches de renforcement diminue à la fois les contraintes de cisaillement et les contraintes normales, en particulier près des bords de la plaque, la conception HS étant plus sensible à ces changements de contraintes de cisaillement ;
- Les conceptions bio-inspirées, en particulier HE et HR, présentent des contraintes d'interface plus élevées que l'orientation standard des fibres, ce qui indique une plus grande sensibilité aux charges hygrothermiques, tandis que l'orientation $[0^\circ/90^\circ]_{14s}$ et la conception HS présentent des distributions de contraintes d'interface plus stables et plus faibles ;
- Le degré d'endommagement « ϕ » a une incidence marquée sur les contraintes normales et de cisaillement, les deux augmentant linéairement, ce qui souligne l'importance de prendre en compte les facteurs environnementaux et les conditions de chargement variables dans la conception et l'analyse des poutres en béton armé renforcées par des CFRP ;

- La rigidité du matériau de la plaque a un effet significatif sur les contraintes initiales de l'interface et la distribution des contraintes sous des charges mécaniques et hygrothermiques combinées.

**Chapitre IV : Étude prédictive du
comportement d'interface d'une poutre en
béton armé renforcée par une plaque
composite de type bio-inspiré sous l'effet
hygro-thermo-mécanique**

IV.1. Introduction

L'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNAs) dans les domaines de l'ingénierie civile et des structures a connu une expansion rapide en raison de leur capacité à modéliser des phénomènes complexes. Ce chapitre examine l'application des RNAs pour prédire les contraintes interfaciales dans les poutres en béton armé (BA) renforcées avec des plaques en polymère renforcé de fibres (FRP) bio-inspirées. Ces plaques, inspirées de la structure hélicoïdale présente dans la nature, offrent des avantages significatifs en termes de répartition des contraintes et de durabilité structurelle.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'efficacité de l'approche par réseau neuronal dans la prédiction des contraintes sous des charges mécaniques, thermiques et hygrothermiques. L'apprentissage de la méthode nous conduira dans ce chapitre à faire tourner notre scripts RNA pour deux cas de renforcement à savoir ; une première poutre renforcée sollicitée à un chargement mécanique uniforme et renforcée par une plaque composite monocouche ; puis, une deuxième étude plus détaillée où on choisira une poutre en béton armé avec porosité soumise à trois types de charges combinée hygro-thermo- mécanique et renforcée par une plaque en matériau de type bio-inspiré.

En plus, ce chapitre explore l'influence des paramètres structurels, tels que l'épaisseur et la configuration des plaques renforçantes, ainsi que des propriétés mécaniques du matériau, sur le comportement des poutres renforcées. Le modèle de RNA développé dans cette étude a été validé à l'aide de données analytiques et numériques, permettant ainsi de comparer les résultats obtenus avec les méthodes classiques.

Ce chapitre se penche également sur l'impact des variables environnementales, telles que la température et l'humidité, sur les performances des structures renforcées, offrant ainsi des perspectives intéressantes pour l'amélioration de la longévité des infrastructures. Les résultats obtenus démontrent la capacité des RNAs à modéliser efficacement les interactions complexes entre les matériaux et les charges, et à fournir des prédictions précises des contraintes interfaciales dans des conditions de charge variées.

IV.2. L'approche d'apprentissage automatique

Dans cette partie nous allons prendre deux cas de renforcement différents ; le premier cas consiste en une poutre en béton armé, avec des bulles d'air, renforcée par un matériau innovant de type bio inspiré ; tandis que le deuxième cas est une poutre en béton armé renforcée par un

matériau composite monocouche. Cette procédure a été faite pour se familiariser avec le choix du RNA approprié en fonction des différentes entrées et des données matérielles et géométriques.

On note que le second cas est fait juste pour la validation du model RNA approprié avec les résultats des recherches de la littérature ouverte ; cependant, le cas du renforcement avec des plaques bio inspirées nous allons procéder à la validation du modèle avec les résultats des recherches extérieures et faire, ensuite, une étude paramétrique détaillées sur l'effet des différents paramètres matériels et géométriques sur l'états mécanique de l'interface.

IV.2.1. Approche de l'apprentissage automatique du model de renforcement par composites bio inspirés

Les réseaux neuronaux artificiels (RNA) sont de puissants modèles de calcul inspirés de la structure et de la fonction du cerveau humain. Les RNA ont de nombreuses applications dans différents domaines Il s'agit d'un modèle de calcul composé d'unités interconnectées, d'éléments de traitement connus sous le nom de neurones, qui effectuent des opérations mathématiques entre les entrées et génèrent ensuite des sorties. La communication entre ces neurones se fait par le biais de liens pondérés. Les poids sont continuellement ajustés en fonction des algorithmes d'apprentissage. En outre, des biais sont intégrés dans les neurones, ce qui modifie le comportement du réseau. Les ANN ont des capacités d'apprentissage et comportent trois couches : (1) couche d'entrée, (2) couche(s) cachée(s) et (3) couche de sortie. Il est donc impératif d'établir une architecture appropriée pour une modélisation réussie, y compris la définition des ensembles entrée-sortie, la formation du réseau et le test des performances [183]. Les RNA ont de nombreuses applications telles que la prévision de la demande, l'optimisation des stocks, la planification logistique et la détection des anomalies [184].

La Rétropropagation du gradient (Back-propagation) et le nœud sont quelques concepts élémentaires qui forment le cœur même des réseaux neuronaux. La rétropropagation est un algorithme de formation de base qui ajuste les poids du réseau afin de réduire au minimum la différence entre les sorties prédites et les sorties réelles. Pour ces ajustements de poids, il utilise le calcul des gradients afin de minimiser les erreurs à chaque itération à travers la méthode de descente de gradient. La rétropropagation fonctionne en propageant l'erreur depuis la couche de sortie vers les couches précédentes, ajustant les poids dans chaque couche pour réduire progressivement l'erreur.

Un « nœud » est une unité individuelle dans une couche où le calcul est effectué. Chaque nœud de la couche prend les entrées des nœuds de la couche précédente, calcule une somme

pondérée et applique une fonction d'activation, qui est souvent non linéaire (comme ReLU ou Sigmoid), ce qui permet au réseau d'apprendre des relations complexes dans les données, puis la transmet à la couche suivante.

IV.2.1.1. Collecte des données - cas de renforcement en matériau bio inspiré -

L'objectif de cette recherche est de développer un modèle de réseau neuronal artificiel (RNA) dédié à la prévision des contraintes d'interface dans les poutres en béton armé (BA) renforcées par des plaques de polymère renforcé par des fibres (FRP) bio-inspirées. Ce modèle a été développé sur un ensemble de données comprenant 63 975 échantillons de paires entrée-sortie, utilisés pour la formation, la validation et le test du modèle ANN. Cet ensemble de données fusionne des points de données numériques obtenus à partir de simulations par éléments finis [185]. En outre, les données obtenues à partir de modèles analytiques développés sur la base de diverses sources documentaires [1, 176, 181, 186].

Le tableau 1 résume les données utilisées dans l'entraînement de modèle, exprime la gamme des valeurs d'entrée et de sortie et présente des statistiques telles que le maximum, le minimum, les moyennes et le coefficient de variation des données. Il présente spécifiquement les différences calculées pour 63 975 points de données afin de donner une idée de l'étendue et de la divergence de l'ensemble.

Tableau IV.1 : Caractéristiques des données d'entraînement

	Entrée														Sortie	
	x	Q	L	a	E1	t1/b1	A'11	D'11	t2/b2	Ea	ta/ba	α	ΔT	ΔC	τ	σ
Count	63975	63975	63975	63975	63975	63975	63975	63975	63975	63975	63975	63975	63975	63975	63975	63975
Moyenne	70	61.817	4629.1	290.43	32363.42	1.380	4.05E-06	1.38E-06	0.0181	3455.8	0.0119	0.0518	33.294	0.0033	0.4915	0.0317
Écart	43.205	21.242	1307.7	72.487	10369.31	0.075	0.000	0.000	0.006	906.66	0.005	0.042	23.584	0.005	0.400	0.193
Min	0	50	3000	200	20000	1.3333	9.35E-07	1.69E-07	0.0089	2000	0.0044	0	0	0	0.0094	-0.2502
25%	30	50	3000	200	30000	1.3333	1.95E-06	4.67E-07	0.0133	3000	0.0089	0	0	0	0.1980	-0.0177
50%	70	50	4000	300	30000	1.3333	2.92 E-06	9.18E-07	0.0178	3000	0.01	0.05	50	0	0.3897	-0.0087
75%	110	50	6000	300	30000	1.5	6.08 E-06	2.03E-06	0.02	4000	0.0133	0.1	50	0.01	0.6653	-0.0034
Max	140	100	6000	400	50000	1.5	2.50E-05	1.87E-05	0.04	5000	0.02	0.1	50	0.01	3.2483	2.1262

IV.2.1.2. Entraînement du modèle RNA - cas de renforcement en matériau bio inspiré -

Pour développer et affiner le modèle de réseau neuronal (RNA), un programme basé sur MATLAB a été développé pour entraîner et tester le modèle RNA. Il existe de nombreuses variantes de l'architecture des réseaux neuronaux artificiels, et la sélection de la forme appropriée et des paramètres associés pour un problème spécifique peut relever davantage de l'art que de la science. Le principe de développement de base des réseaux neuronaux artificiels implique une approche générale qui comprend généralement trois étapes clés : l'entraînement, la validation et le test. Au cours de ce processus, les poids et les biais sont ajustés de manière répétée à l'aide d'algorithmes mathématiques, l'algorithme de rétropropagation étant utilisé pour démontrer son efficacité dans des problèmes difficiles comme celui-ci [187], afin d'apprendre à partir d'ensembles de données réels et de générer un modèle de réseau neuronal artificiel. Par la suite, le modèle démontrant la plus grande précision dans la prédiction des résultats avec l'erreur quadratique moyenne (MSE) la plus faible est sélectionné.

Pour garantir les capacités d'apprentissage robustes du modèle RNA, l'ensemble de données a été divisé de manière aléatoire en trois ensembles : (75 %) pour l'entraînement, (20 %) pour la validation et (05 %) pour le test. Les données ont été analysées en utilisant l'approche RNA à l'aide du logiciel MATLAB. La fonction de transfert log-sigmoïde a été choisie pour son efficacité, afin de relever les défis complexes de la régression et d'assurer l'adaptabilité nécessaire pour refléter les complexités des données. Afin d'obtenir la flexibilité nécessaire pour que le modèle RNA s'adapte à la complexité des données, l'architecture optimale du réseau a été déterminée par un processus d'essais et d'erreurs, en faisant varier le nombre de couches cachées et de nœuds dans la première couche cachée de 1 à 22 et dans la deuxième couche cachée de 1 à 20, ce qui a permis de créer 462 modèles ANN, ouvrant ainsi la voie à l'identification de l'architecture de réseau la plus efficace.

IV.2.1.3. Validation du modèle RNA choisi - cas de renforcement en matériau bio inspiré -

Le modèle du réseau neuronal artificiel (RNA) nécessite une validation, l'une des étapes les plus essentielles de l'ensemble du processus de développement, garantissant sa robustesse et sa fiabilité dans le cadre d'une application réelle. Il s'agit de la phase importante de validation des paramètres du modèle afin de minimiser l'ajustement excessif et de garantir la généralisabilité.

Les modèles proposés ont ensuite été testés sur la base d'indicateurs de performance statistique et d'une présentation graphique. Les principaux indicateurs utilisés pour la comparaison comprennent l'erreur quadratique moyenne (**MSE**) et le coefficient de corrélation

de Pearson (R), et la comparaison des résultats avec les modèles analytiques de la littérature existante a joué un rôle crucial. Cette phase de validation a été itérative, pour choisir la meilleure architecture.

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{tar,i} - Y_{out,i})^2 \quad \text{IV.1}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N ((Y_{tar,i} - \overline{Y_{tar}})(Y_{out,i} - \overline{Y_{out}}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N ((Y_{tar,i} - \overline{Y_{tar}})^2 (Y_{out,i} - \overline{Y_{out}})^2)}} \quad \text{IV.2}$$

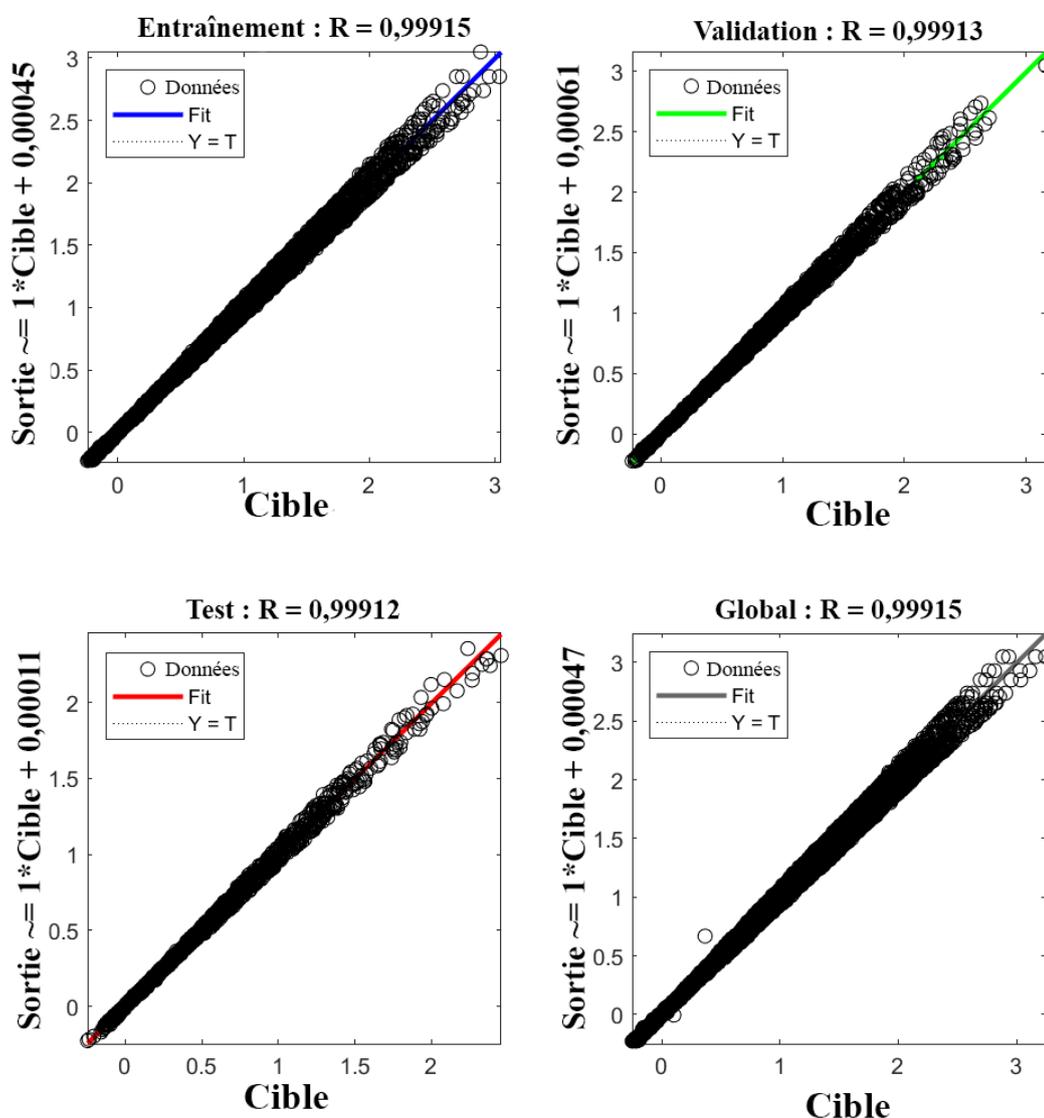


Figure IV.1 : Analyse de régression entre la sortie et la cible pour l'ensemble des données.

Les graphiques de dispersion de la figure IV.1 montrent la régression entre les valeurs de sortie et les valeurs cibles. Les observations visuelles des distributions des points de données sont faites à partir de ces diagrammes, tout au plus dans les relations entre les sorties prédites et les valeurs cibles réelles. $R_{\text{train}} = 0.99915$; $R_{\text{val}} = 0.99913$; $R_{\text{test}} = 0.99912$; and $R_{\text{all}} = 0.99915$.

Le changement du coefficient de corrélation en fonction des variations du nombre de neurones dans les couches cachées est illustré à la figure IV.2, ce qui montre d'un processus de construction de modèle bon et efficace. Le modèle de RNA choisi comme le meilleur est le modèle 14-18-9-2, qui comporte deux couches cachées avec 18 neurones dans la première et 9 neurones dans la seconde (figure IV.3).

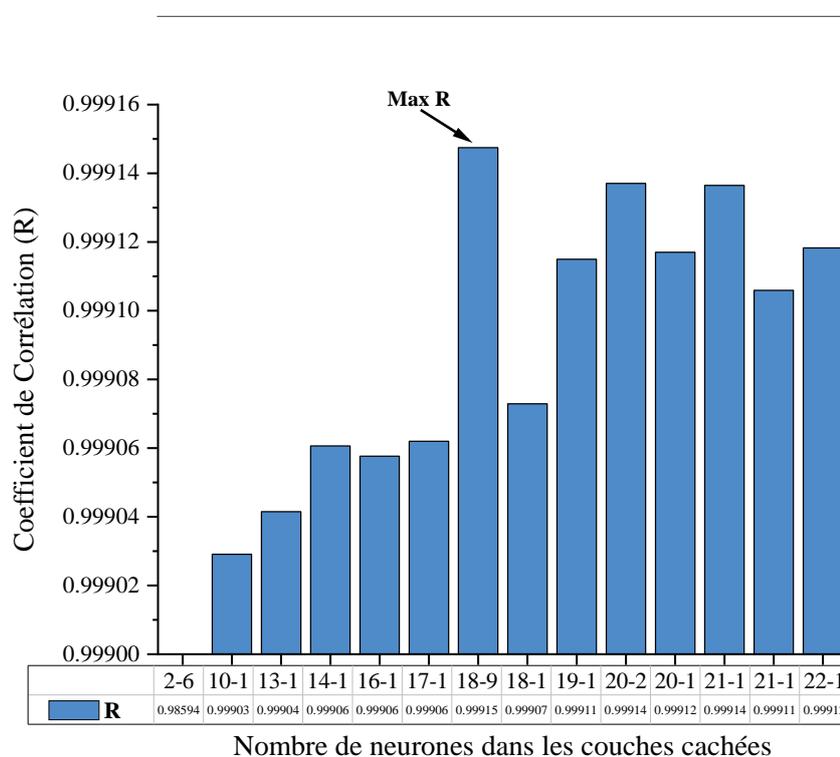


Figure IV.2 : Coefficient de corrélation en fonction du nombre de neurones dans les couches cachées

Ce modèle a été sélectionné par essais et erreurs afin d'optimiser les erreurs et la corrélation. Cette expérience a permis de sélectionner la meilleure configuration en fonction des différentes couches et des différents neurones. La formation a été interrompue lorsque l'erreur quadratique moyenne (MSE) était minimale et que la corrélation (valeur R) entre la cible et la sortie était très bonne. La validation du modèle RNA développé dans la présente étude est effectuée à l'aide de ces méthodologies, garantissant la fiabilité et l'efficacité de la prédiction des contraintes d'interface des poutres en béton armé renforcées avec des plaques en FRP bio-inspirées.

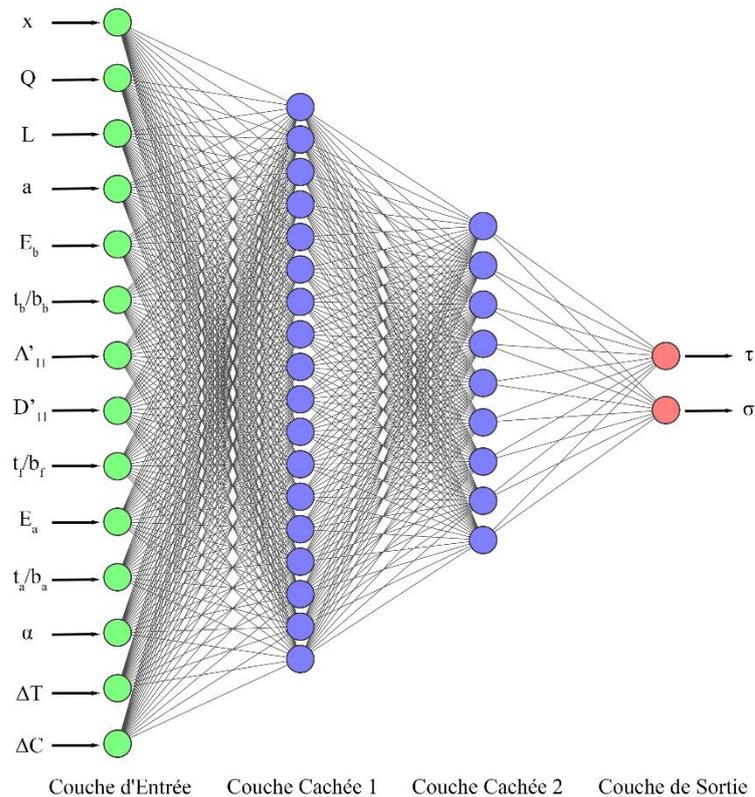


Figure IV.3 : Architecture utilisée dans le modèle de réseau neuronal

IV.2.2. Approche de l'apprentissage automatique du model de renforcement par composites monocouche

IV.2.2.1. Collecte des données - cas de renforcement en monocouche -

L'objectif principal de cette étude est de développer un modèle de réseau neuronal artificiel (RNA) qui prédit les contraintes d'interface dans une poutre endommagée renforcée par des plaques en FRP. Pour ce faire, un ensemble substantiel de données de diverses mesures de contraintes normales et de cisaillement à l'interface a été rassemblé à partir de diverses sources. Cet ensemble de données, essentiel pour l'entraînement, la validation et le test du modèle RNA, consiste en 3339 points de données analytiques et numériques uniques, provenant de plusieurs études [1, 181, 188-190]. Cette collection complète de données a été déterminante pour la construction et l'ajustement du modèle.

Le tableau IV.2 donne des détails sur les données utilisées dans l'entraînement de model, comme la gamme des entrées et des sorties. Il contient également détails sur les données, comme le maximum, le minimum, la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation. Le tableau comprend les variations calculées pour 3339 points de données.

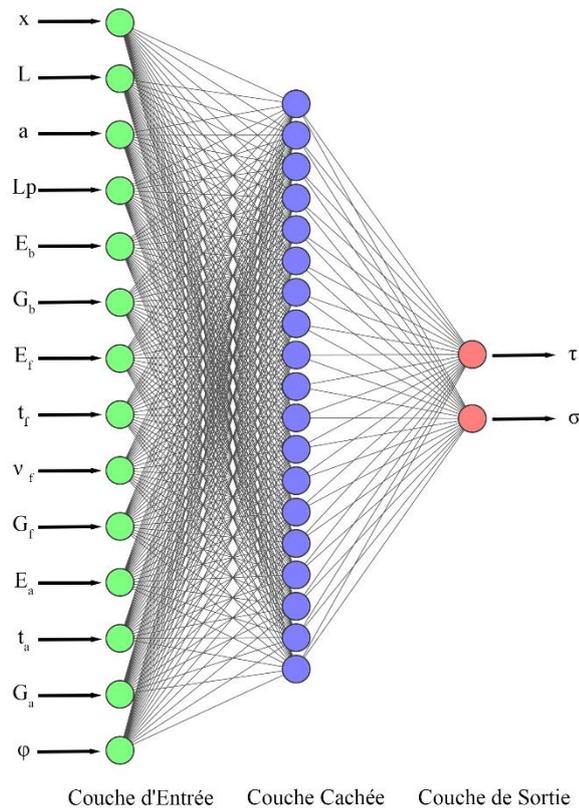


Figure IV.4 : Architecture utilisée dans le modèle de réseau neuronal (18-19-2) - cas de renforcement en monocouche -

IV.2.2.2. Model d'entraînement du cas de renforcement en monocouche

L'ensemble de données a été divisé de manière aléatoire en trois ensembles : (70 %) pour la formation, (20 %) pour la validation et (10 %) pour le test. Les données ont été analysées en utilisant l'approche RNA à l'aide du logiciel MATLAB. Pour résoudre les problèmes de régression complexes, la fonction de transfert log-sigmoïde a été choisie en raison de son efficacité prouvée. Afin d'obtenir la flexibilité souhaitée, une couche cachée a été incorporée dans le réseau. L'architecture optimale du réseau a été déterminée par un processus d'essais et d'erreurs, en faisant varier le nombre de nœuds de la couche cachée de 1 à 23, ce qui a abouti à la création de 23 modèles RNA.

Tableau IV.2 : Paramètres statistiques de la base de données

	Entrée																		Sortie		
	x	Q	L	a	L _p	E1	t ₁	ν ₁	G ₁	E ₂	t ₂	ν ₂	G ₂	E _a	t _a	ν _a	G _a	φ	τ	σ	
Count	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339	3339
Max	160	50	3300	400	2900	50000	300	0.18	21186.4	200000	8	0.3	76923.1	6700	4	0.35	2481.48	0.3	3.274	1.802	
Min	0	50	2800	150	2200	20000	300	0.18	8474.5	50000	2	0.28	5000	2000	2	0.35	740.740	0	0.0578	-0.1874	
Moyenne	80	50	3088.2	276.639	2534.92	30254.5	300	0.18	12819.7	135777	3.531	0.2859	26238.7	2910.39	3.04821	0.35	1077.92	0.09928	0.8198	0.0403	
Écart	48.911	0	146.20	59.990	153.30	3559.12	0	0	1508.1	54961.8	1.041	0.0091	32814.5	589.794	0.9989	0	218.442	0.1149	0.5754	0.2350	
Coefficient de variation	61.138	0	4.734	21.685	6.047	11.763	0	0	11.763	40.479	29.481	3.182	125.061	20.265	32.770	0	20.265	115.733	70.187	583.12	

IV.2.2.3. Validation du model RNA choisi - cas de renforcement en monocouche -

La performance prédictive des modèles proposés a été évaluée à l'aide d'indicateurs de performance statistique et d'une présentation graphique. Les indicateurs de performance statistique utilisés sont l'erreur quadratique moyenne (MSE) et le coefficient de corrélation de Pearson (R).

La figure IV.5 montre des diagrammes de dispersion qui illustrent la régression entre les valeurs de sortie et les valeurs cibles. Ces diagrammes fournissent une représentation visuelle des points de données et aident à analyser la corrélation entre la sortie prédite et les valeurs cibles réelles. $R_{ent}=0.99732$, $R_{val}=0.99455$, $R_{test}=0.99801$ and $R_{global}=0.99837$.

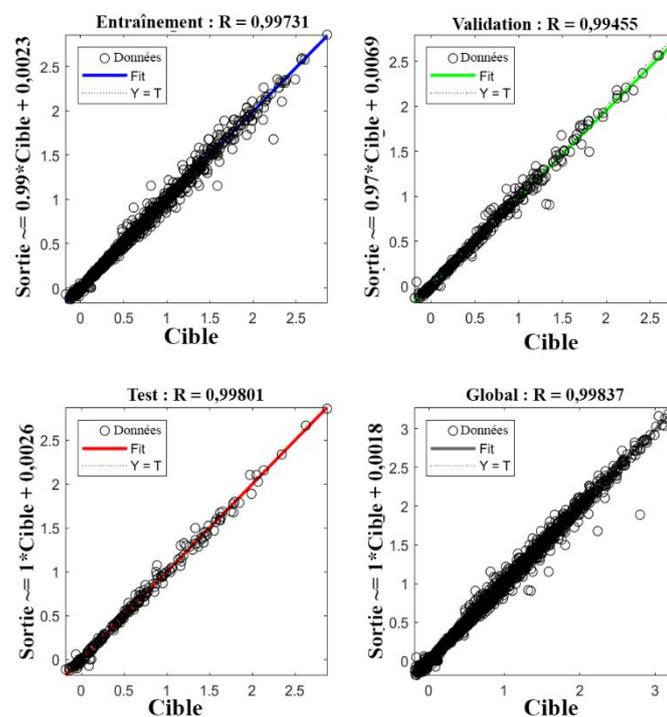
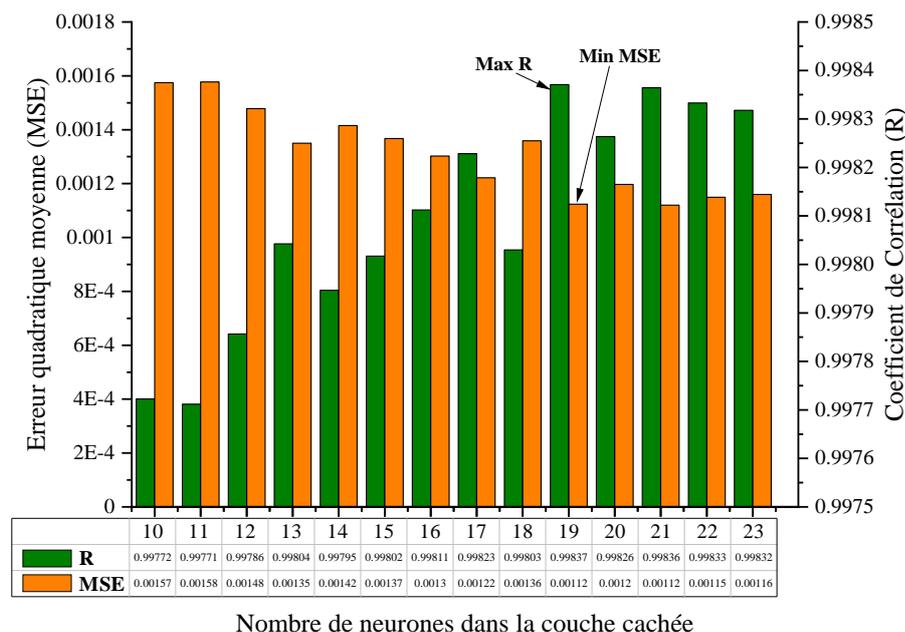


Figure IV.5 : Analyse de régression entre la sortie et la cible pour l'ensemble des données - cas de renforcement en monocouche -

La figure IV.6 montre comment le coefficient de corrélation (R) et l'erreur quadratique moyenne (MSE) évoluent en fonction du nombre de neurones dans la couche cachée, ce qui permet d'évaluer l'efficacité du modèle. La conception du réseau, à savoir 18-19-2, indiquant une couche cachée avec 19 neurones, a été choisie par essais et erreurs afin d'optimiser les erreurs et la corrélation. Cette méthode a consisté à expérimenter différentes couches et différents neurones pour trouver la meilleure configuration.



Nombre de neurones dans la couche cachée

Figure IV.6 : MSE et R en fonction du nombre de neurones dans la couche cachée - cas de renforcement en monocouche -

IV.3. Validations des résultats des modèles RNA's

IV.3.1. Validation des résultats du model RNA pour le cas d'un renfort monocouche

Afin de valider la précision du modèle RNA que nous proposons pour prédire la contrainte interfaciale dans les poutres en béton armé renforcées par des plaques composites, nous avons mené une étude utilisant à la fois un modèle analytique et des modèles de réseaux de neurones artificiels (RNA), qui sont basés sur les données de la présente étude analytique et d'études antérieures. Cette section présente plusieurs exemples divers pour évaluer l'efficacité des modèles RNA dans la prédiction des contraintes interfaciales. Le tableau IV.3 présente les matériaux utilisés dans les sous-sections pour la validation.

Tableau IV.3 : Propriétés géométriques et matérielles de la poutre en BA, de l'adhésif et de la plaque de renforcement [181]

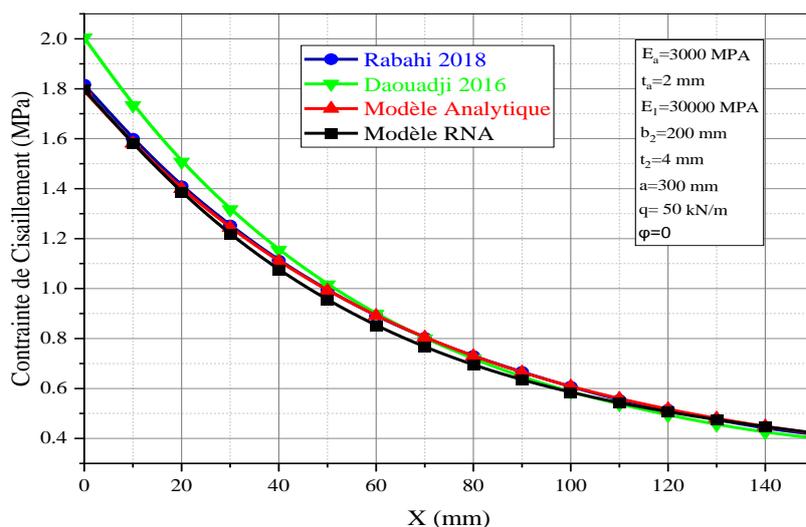
Élément	Matériau	b_i (mm)	t_i (mm)	E_i (MPa)	ν_i	G_i (MPa)
Poutre	Béton	200	300	30000	0.18	-
Adhésif	Résine époxy	200	2	3000	0.35	-
Plaque de renforcement	Acier	200	4	200000	0.30	-
	C-FRP	200	4	140000	0.28	5000
	G-FRP	200	4	50000	0.28	5000

Cet étude l'utilisation de divers matériaux composites pour renforcer les ponts en béton armé existants. Nous avons mené une étude de démonstration sur un pont-poutre en utilisant trois matériaux : Polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP), Polymère renforcé de fibres de verre (GFRP) et acier. L'objectif principal était d'identifier les défis pratiques qui pourraient survenir lors de l'application aux structures existantes. La poutre simplement soutenue d'une portée de 3000 mm, a été soumise à une charge uniformément répartie. Le tableau IV.3 résume ses propriétés géométriques et matérielles. La distance entre le support et l'extrémité de la plaque était de 300 mm.

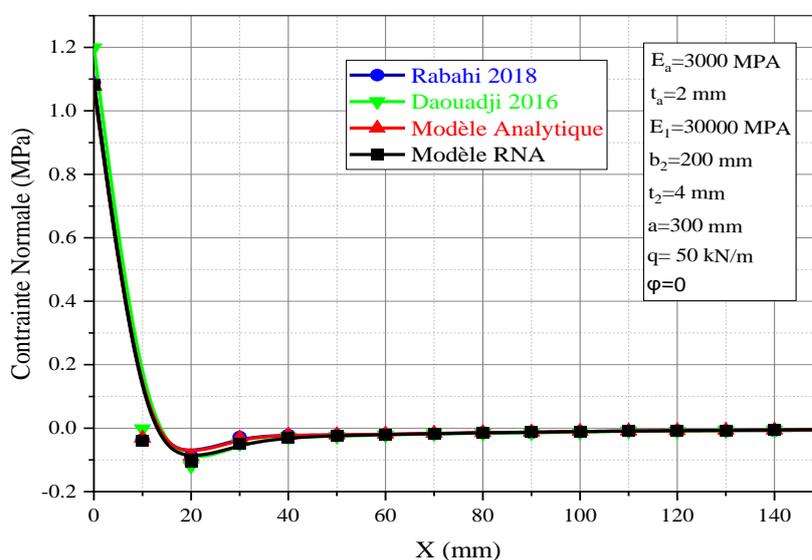
Tableau IV.4 : Comparaison des contraintes normales et de cisaillement interfaciales (MPa) soumise à une charge uniformément répartie

Poutre en BA ($\phi=0$) renforcées avec une plaque FRP						
Modèle	Plaque CFRP		Plaque GFRP		Plaque Acier	
	Cisaillement	Normal	Cisaillement	Normal	Cisaillement	Normal
Rabahi 2018	1.812	1.0893	1.093	0.832	2.126	1.176
T.H Daouadji 2016	1.998	1.1887	1.211	0.912	2.340	1.281
Modèle actuel - Analytique	1.791	1.078	1.080	0.823	2.120	1.175
Modèle actuel- RNA	1.796	1.083	1.123	0.856	2.179	1.170
Poutre en BA endommagée ($\phi=0,1$) renforcées avec une plaque FRP						
Modèle	Plaque CFRP		Plaque GFRP		Plaque Acier	
	Cisaillement	Normal	Cisaillement	Cisaillement	Normal	Cisaillement
Rabahi 2018	1.916	1.156	1.162	0.889	2.239	1.244
T.H Daouadji 2016	2.116	1.263	1.290	1.290	2.469	1.357
Modèle actuel - Analytique	1.896	1.145	1.155	0.882	2.233	1.242
Modèle actuel- RNA	1.963	1.182	1.209	0.921	2.319	1.283

Le tableau IV.3 et la figure 6 montrent la distribution de la contrainte de cisaillement interfaciale et de la contrainte normale longitudinale près de l'extrémité de la plaque pour l'exemple de la poutre en béton armé collée avec chaque matériau. La comparaison des prédictions de notre méthode actuelle avec celles d'autres méthodes révèle une étroite concordance avec d'autres études



(a) Contrainte de Cisaillement



(b) Contrainte Normale

Figure IV.7 : Comparaison des contraintes interfaciales dans les poutres en BA renforcées avec une plaque CFRP

IV.3.2. Validation des résultats du model RNA pour le cas d'un renfort en bio inspiré

L'étude suivante a été réalisée pour valider la méthode proposée en comparant le modèle de réseau neuronal artificiel (RNA) pour la prédiction de la contrainte interfaciale dans les poutres en béton armé (BA) renforcées avec des plaques composites avec des modèles analytiques.

Quelques exemples différents sont pris en compte dans cette section pour estimer l'efficacité du modèle RNA dans la prédiction de la contrainte interfaciale. Le matériau de la présente étude est une poutre en béton armé remplie de bulles d'air et renforcée par une plaque

FRP hélicoïdale. Le tableau IV.5 présente les matériaux utilisés pour la validation et l'étude paramétrique. Dans le cas où la longueur de la poutre en béton armé est de 3000 mm, la distance entre le support et l'extrémité de la plaque est de 300 mm et la charge uniformément répartie (UDL) est de 50 kN/m.

Tableau IV.5 : Propriétés géométriques et matérielles de la poutre en BA, de l'adhésif et de la plaque de renforcement

Eléments	Matériau	b_i (mm)	t_i (mm)	E_{11} (MPa)	E_{22} (MPa)	ν_i	G_i (MPa)
Poutre	Béton	200	300	30000	30000	0.18	-
Adhésif	Résine époxy	200	2	3000	3000	0.35	-
Plaque de renforcement	C-FRP	200	4	140000	10000	0.28	5000

Le Tableau IV.6 illustre la variation dans les configurations de conception hélicoïdale en fonction du nombre de couches pour trois types de feuilles composites renforcées bio-inspirées : HR, HE et HS. Chaque conception utilise une approche distincte pour définir le chemin des fibres dans le stratifié. Le type HR utilise une approche récursive, le type HE suit une fonction exponentielle, et le type HS intègre un motif semi-circulaire. Les configurations de couches sont spécifiées par les angles θ pour chaque type, variant selon le nombre de couches (12, 24, 32).

Tableau IV.6 : Variation de la configuration des dessins hélicoïdaux en fonction du nombre de couches

Nomenclature	Nombre de couches		
	12	24	32
Hélicoïdal-récursif HR1($\beta=1$) $\theta_1/\theta_2/\theta_3/ \dots \theta_n = \theta_{n-1} + \beta(n - 1)$	[0/1/3/6/10/15] _s	[0/1/3/6/10/16/21/28/36/45/55/66] _s	[0/1/3/6/10/15/21/28/36/45/55/66/78/91/105/120] _s
Hélicoïdale-exponentielle HE3($\gamma=3$) $\theta_1/\theta_2/\theta_3/ \dots \theta_n = \gamma^n$	[3/9/27] _{2s}	[3/9/27/81/243/729] _{2s}	[3/9/27/81/243/729/2187/6561] _{2s}
Hélicoïdal-sémi-circulaire HS ($\varphi=90$) $\theta_1// \dots \theta_n = \sqrt{\varphi^2 - (\rho(n - 1) - \varphi)^2}$ $\rho = 18$	[0/54/72/82.5/88.2/ 90] _s $\rho = 18$	[0/37.1/51.2/61.2/68.8/74.8/79.6/83.3/86.2/88.2/89.4/90] _s $\rho = 8$	[0/32.3/44.9/54/61.2/67/72/76.2/79.6/82.5/84.9/86.7/88.2/89.2/89.8/90] s $\rho = 6$

En rappelle que les 3 phases de différentes charges appliquées sont :

- Phase 1 : Charge mécanique ($Q=50$ kN/m).
- Phase 2 : Charge mécanique ($Q=50$ kN/m), Charge thermique ($\Delta T = 50^\circ\text{C}$)
- Phase 3 : Charge mécanique ($Q=50$ kN/m), charge hygrothermique ($\Delta T= 50^\circ\text{C}$, $\Delta C=01\%C$)

IV.3.3. Etude Numérique

IV.3.3.1. Présentation sur Méthode des éléments finis (MEF) et logiciel Abaqus

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique numérique largement utilisée pour résoudre des problèmes complexes de mécanique des structures, de transfert thermique, de dynamique des fluides et de nombreux autres domaines de l'ingénierie. Elle repose sur la division d'une structure complexe en éléments finis simples et interconnectés, facilitant ainsi la résolution des équations différentielles partielles régissant le comportement du système. Chaque élément est défini par ses propres propriétés matérielles et géométriques, et les équations de comportement sont formulées et résolues pour chaque élément, permettant d'obtenir une solution approximative pour l'ensemble de la structure. Cette méthode est particulièrement avantageuse pour les analyses complexes où les formes, les matériaux et les conditions de chargement ne permettent pas de solution analytique simple.

Le logiciel Abaqus, l'un des outils de MEF les plus performants largement adoptés, offre une plateforme robuste pour les analyses avancées de structures. Développé pour traiter des problèmes non linéaires et multi-physiques, Abaqus permet de modéliser des comportements variés tels que les déformations plastiques, les interactions de contact, et les effets thermomécaniques. Dans le cadre de cette thèse, Abaqus est utilisé pour valider les modèles de prévision de contraintes interfaciales dans les poutres en béton armé renforcées par des plaques en FRP, en simulant le comportement mécanique des matériaux sous diverses charges et conditions.

IV.3.3.2. Modélisation par éléments finis

Dans cette partie, un modèle par éléments finis est développé, utilisant le logiciel commercial Abaqus pour évaluer les contraintes d'interface pour une poutre en béton armé renforcée avec une plaque en fibre de carbone bio-inspirée collée. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus par des solutions analytiques et le modèle RNA.

La modélisation dans le logiciel Abaqus suit un processus de définition détaillée des différents composants du modèle, comprenant la poutre en béton armé (BA), la plaque en fibre de carbone CFRP, et la couche d'adhésif. Chaque composant est défini en tant que « part » (partie) dans Abaqus, permettant une intégration harmonieuse entre les éléments pour réaliser une analyse complète. Ce processus de modélisation est itératif, reposant sur plusieurs analyses pour simuler efficacement des caractéristiques spécifiques. Le modèle est en 2D et utilise des éléments bilinéaires en contraintes planes (CPS4R), avec des matériaux homogènes et élastiques, possédant les mêmes propriétés que celles du modèle analytique, à l'exception de la plaque de renforcement. Cette dernière est divisée en 16 couches égales, tenant compte de l'orientation des fibres dans chaque couche, avec une conception bio-inspirée hélicoïdale-semicirculaire (HS), comme indiqué dans le tableau IV.6. Le contact entre les différentes parties est supposé parfait, avec une contrainte de type « Tie ».

Pour une meilleure précision dans la zone de l'interface, la taille des éléments a été réduite au bord de la plaque. Ainsi, le maillage dans les 200 premiers millimètres de la plaque est constitué de 350 éléments longitudinaux, qui augmentent progressivement en taille vers le centre de la structure, comme illustré dans la figure IV.8. En raison de la symétrie de la structure, seule la moitié de celle-ci a été modélisée, ce qui permet de réduire la taille du problème de moitié tout en respectant les conditions aux limites au niveau de l'axe de symétrie central.

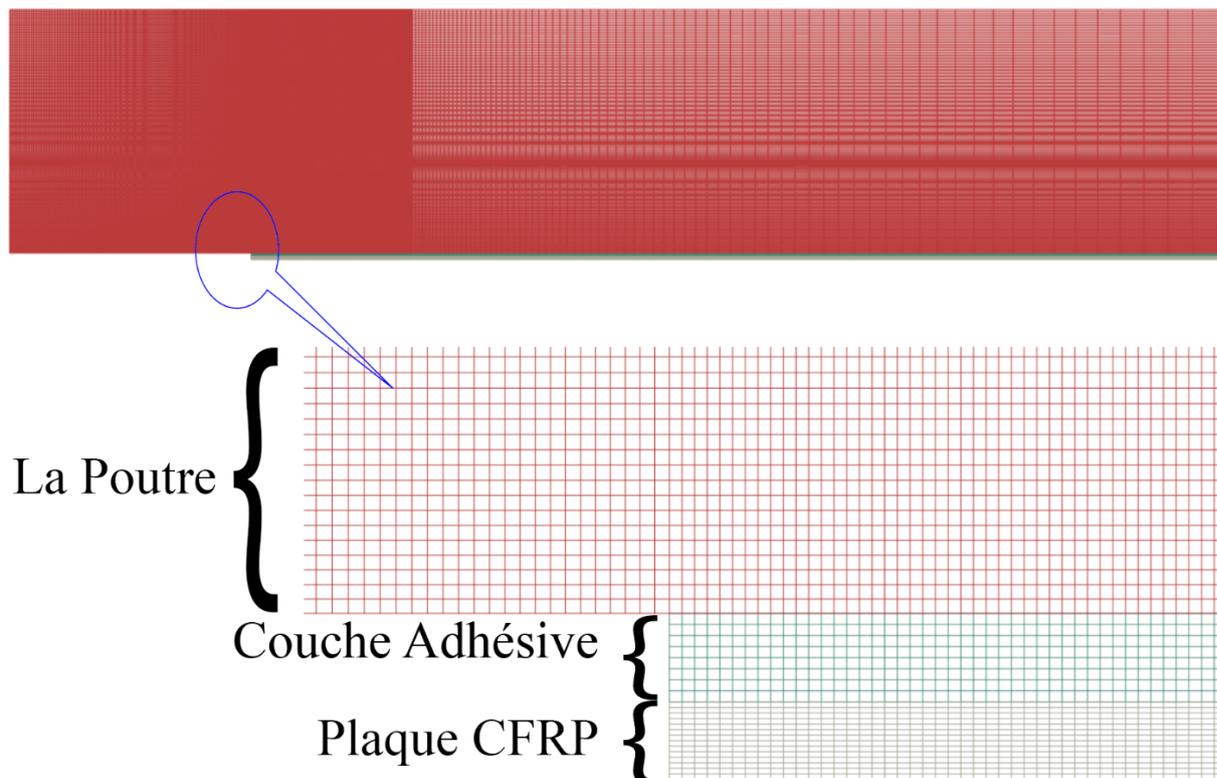


Figure IV.8: Maillage en éléments finis du modèle au bord de la plaque

Pour assurer la symétrie requise, tous les nœuds à mi-portée ont été contraints, tandis que les nœuds aux extrémités de la poutre en BA ont été fixés pour représenter des appuis simples. Le maillage des éléments finis a été affiné aux extrémités du renforcement afin de capter précisément la concentration des contraintes dans ces zones. Au total, le modèle comporte 168 750 éléments et 169 676 nœuds pour la poutre, 6 800 éléments et 7 242 nœuds pour la plaque de FRP, et 3 400 éléments et 3 834 nœuds pour l'adhésif. Le nombre d'éléments utilisés dépend en grande partie des paramètres géométriques, tels que la longueur et le périmètre de la section transversale. Afin d'obtenir des résultats précis concernant les contraintes d'interface aux extrémités de la plaque, un maillage fin a été appliqué dans ces zones, comme illustré dans la figure IV.8.

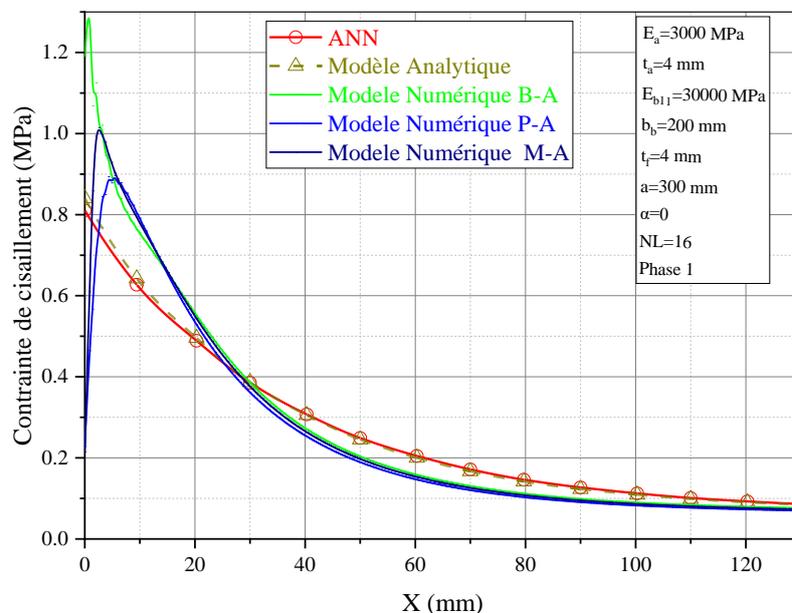
Les caractéristiques géométriques et les propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans l'analyse par éléments finis sont identiques à celles de l'analyse analytique et sont présentées dans le tableau V.7. La charge uniformément répartie (UDL) appliquée est de 50 kN/m.

Tableau IV.7 : Propriétés géométriques et matérielles utilisés dans les analyses numérique

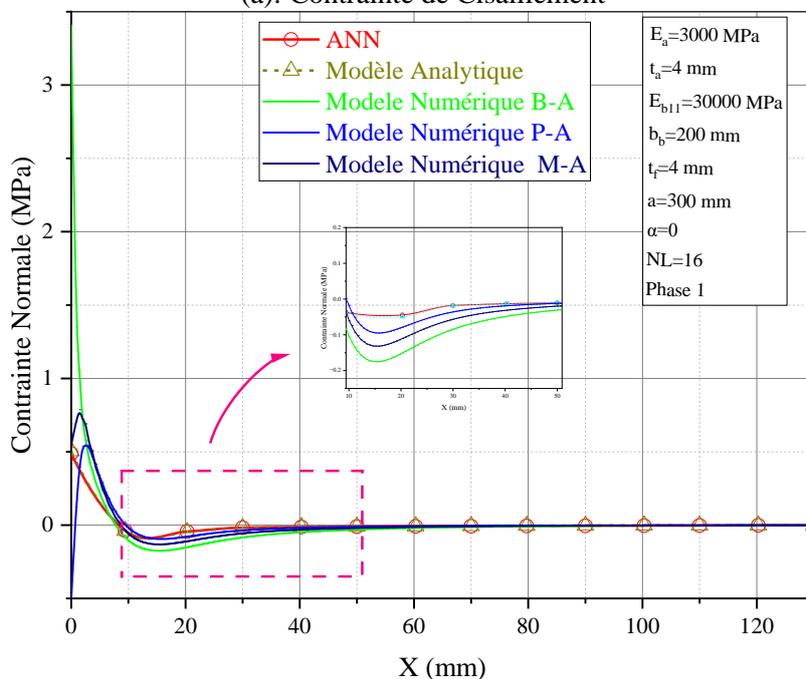
Poutre	Propriétés géométriques			
	L = 3 000 mm		b _b = 200 mm	t _b = 300 mm
	Propriétés du matériau			
	E _b =30 000 MPa		ν _b = 0.30	
CFRP	Propriétés géométriques			
	L _p = 2 400 mm		b _f = 200 mm	t _f = 4 mm
	Propriétés du matériau			
	E ₁₁ =140000MPa	E ₂₂ = 10000 MPa	ν _f = 0.28	G _f = 5000 MPa
Adhésif	Propriétés géométriques			
	L _p = 2 400 mm		b _a = 200 mm	t _a = 4 mm
	Propriétés du matériau			
	E _a =3 000 MPa		ν _a = 0.35	

Les figures IV.9 fournissent une comparaison de la distribution des contraintes de cisaillement et normales le long de l'interface de renforcement dans une poutre en béton armé renforcée par une plaque composite, en utilisant trois approches : le modèle de réseau de neurones artificiels (RNA) nouvellement développé avec ceux obtenus à partir de modèle analytique, les résultats obtenus par le modèle numérique : B-A (béton-adhésif), P-A (plaque-adhésif), et M-A

(milieu d'adhésif). Ces comparaisons sont faites pour une conception hélicoïdale-semicirculaire (HS) avec 16 couches ($N = 16$) dans des conditions de $\alpha=0$ au cours de la phase 1. Globalement, les résultats du modèle ANN montrent un accord satisfaisant avec le modèle analytique, démontrant ainsi la capacité des réseaux de neurones artificiels à prédire efficacement les distributions de contraintes interfaciales.



(a): Contraite de Cisaillement



(b): Contraintes Normales

Figure IV.9 : Comparaison des contraintes interfaciales dans les poutres en BA renforcées avec des plaques en CFRP (HS, $N=16$, $\alpha = 0$, Phase 1).

Les résultats obtenus à partir du modèle de réseaux de neurones artificiels (RNA) montrent une concordance satisfaisante avec les prédictions issues du modèle numérique basé sur la

méthode des éléments finis (Abaqus). Cette comparaison permet de valider la capacité du modèle RNA à simuler les distributions de contraintes interfaciales dans les poutres en béton armé renforcées par des plaques composites, tout en offrant une alternative plus rapide et moins coûteuse en termes de calcul par rapport aux modèles numériques traditionnels. En particulier, pour les contraintes de cisaillement, le modèle RNA reproduit avec précision la tendance globale observée dans le modèle numérique. Les valeurs de cisaillement calculées par RNA sont en étroite corrélation avec celles du modèle numérique, en particulier dans les zones proches de l'extrémité de la plaque, où les concentrations de contraintes sont plus marquées. Cependant, des écarts mineurs peuvent être notés dans certaines régions spécifiques de la structure, principalement attribuables aux simplifications du modèle RNA par rapport à la finesse de la discrétisation numérique. Concernant les contraintes normales, le modèle RAN parvient également à prédire des valeurs proches de celles du modèle numérique. La distribution des contraintes normales dans la région de l'interface montre une tendance similaire, bien que le modèle numérique puisse capturer certains détails plus fins, notamment dans les zones de transition, en raison de la précision de la méthode des éléments finis. Malgré cela, le modèle RNA offre une alternative prometteuse pour prédire les comportements de contraintes avec une bonne précision globale.

En ce qui concerne les différences entre les résultats obtenus par le modèle numérique : B-A (béton-adhésif), P-A (plaque-adhésif), et M-A (milieu d'adhésif) dans les premiers millimètres, on observe une variation notable des valeurs de contraintes de cisaillement et normales. Ces différences peuvent être expliquées par la variation des contraintes via l'épaisseur de l'adhésif. Cette analyse met en évidence l'importance de considérer l'épaisseur et les caractéristiques de l'adhésif dans la modélisation numérique pour capturer précisément les distributions de contraintes, en particulier dans les zones critiques de l'interface de renforcement.

À partir des résultats du modèle numérique, il est possible de conclure qu'en cas de délaminage, la probabilité de rupture est plus élevée à l'interface entre le béton et l'adhésif (béton-adhésif). Cela s'explique par la concentration significative des contraintes à cette interface par rapport à l'autre interface P-A (plaque-adhésif). Par conséquent, on peut s'attendre à ce que l'adhésif reste fixé à la plaque après la séparation, indiquant que le point de faiblesse principal réside à l'interface béton-adhésif. Cela souligne la nécessité d'accorder une attention particulière à l'amélioration de la cohésion de cette interface pour garantir une performance structurelle optimale du renforcement.

IV.4. Étude paramétrique

Comme on l'a déjà signalé, cette étude est consacrée au modèle de la poutre poreuse soumise à trois types de chargement et renforcées par une plaque de type bio inspiré. Le tableau IV.8 présente les données relatives aux contraintes interfaciales pour des poutres en béton armé (RC) endommagées, collées avec une plaque en CFRP sous une charge uniformément répartie.

L'analyse est divisée en trois étapes distinctes : L'étape 1 implique uniquement une charge mécanique de 50 kN/m; l'étape 2 combine cette charge mécanique avec une charge thermique ($\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$) ; et l'étape 3 incorpore une charge mécanique, une charge thermique ($\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$), et une charge hygrothermique ($\Delta C = 01\%$). Le tableau compare trois conceptions bio-inspirées de plaques composites stratifiées hélicoïdales : Hélicoïdal-récuratif (HR), Hélicoïdale-exponentielle (HE), et Hélicoïdal-semi-circulaire (HS).

Bien qu'il y ait des variations mineures, une tendance générale à l'augmentation de la contrainte de cisaillement interfaciale (τ) et de la contrainte normale (σ) à travers toutes les étapes et tous les modèles est observée à mesure que l'épaisseur du panneau composite (t_f) augmente. En outre, nous constatons que la contrainte de cisaillement interfaciale (τ) et la contrainte normale (σ) diminuent toutes deux à mesure que le nombre de couches (N) augmente. Le modèle HS tend à produire les contraintes interfaciales les plus faibles parmi les trois modèles, ce qui suggère qu'il offre une meilleure gestion des contraintes dans différentes conditions de chargement. En revanche, le modèle HR présente généralement les niveaux de contrainte les plus élevés, ce qui indique qu'il pourrait être moins efficace pour atténuer les contraintes interfaciales, tandis que le modèle HE se situe entre les deux. Une observation remarquable des données est que la phase 3 n'entraîne pas toujours des contraintes interfaciales plus élevées que la phase 2, bien qu'elle soit soumise à une charge hygrothermique supplémentaire. Dans plusieurs cas, les contraintes de la phase 3 sont en fait inférieures à celles de la phase 2. Ce résultat suggère que les effets combinés des charges mécaniques, thermiques et hygrothermiques à la phase 3 pourraient conduire à une interaction plus complexe à l'interface des matériaux, ce qui pourrait potentiellement redistribuer ou même réduire les contraintes interfaciales globales par rapport au scénario de la phase 2. En général, les résultats suggèrent que la conception HS est la plus efficace pour diminuer les contraintes interfaciales, en particulier lorsqu'il s'agit de régimes de charge complexes. Il est essentiel de déterminer le type d'armature et les caractéristiques des matériaux appropriés pour maximiser les performances et la longévité des poutres en béton armé soumises à différentes contraintes environnementales et mécaniques.

Tableau IV.8 : Poutre en BA endommagée ($\alpha = 0,1$) renforcées avec une plaque en CFRP sous une charge répartie

t _f N	Phase 1						Phase 2						Phase 3						
	HR		HE		HS		HR		HE		HS		HR		HE		HS		
	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	
4	12	1.961	1.156	1.823	1.130	1.011	0.714	2.633	1.556	2.449	1.508	1.389	0.961	2.532	1.503	2.354	1.456	1.330	0.926
	16	1.874	1.124	1.653	1.067	0.946	0.689	2.516	1.503	2.228	1.424	1.301	0.929	2.419	1.451	2.141	1.375	1.246	0.894
	24	1.623	1.004	1.590	1.048	0.891	0.670	2.191	1.337	2.147	1.401	1.229	0.906	2.105	1.292	2.062	1.351	1.176	0.870
	28	1.546	0.968	1.585	1.049	0.869	0.662	2.092	1.290	2.140	1.402	1.200	0.896	2.009	1.245	2.056	1.353	1.148	0.860
	32	1.466	0.927	1.505	1.015	0.859	0.660	1.988	1.237	2.036	1.358	1.188	0.892	1.908	1.194	1.955	1.310	1.136	0.856
6	12	2.338	1.569	2.178	1.515	1.230	0.958	3.097	2.045	2.896	1.978	1.679	1.270	2.980	1.971	2.786	1.905	1.609	1.220
	16	2.235	1.512	1.987	1.438	1.155	0.936	2.968	1.973	2.655	1.881	1.581	1.242	2.856	1.901	2.552	1.811	1.514	1.193
	24	1.949	1.349	1.916	1.420	1.090	0.930	2.607	1.766	2.565	1.859	1.495	1.235	2.506	1.700	2.465	1.790	1.431	1.186
	28	1.860	1.301	1.910	1.423	1.064	0.927	2.494	1.705	2.558	1.863	1.460	1.232	2.397	1.641	2.458	1.794	1.398	1.183
	32	1.766	1.246	1.816	1.386	1.052	0.929	2.374	1.636	2.439	1.816	1.444	1.234	2.280	1.574	2.343	1.748	1.382	1.185
8	12	2.584	1.874	2.423	1.804	1.390	1.159	3.398	2.421	3.199	2.335	1.891	1.542	3.271	2.327	3.078	2.243	1.812	1.473
	16	2.481	1.815	2.225	1.708	1.308	1.119	3.271	2.348	2.954	2.217	1.785	1.493	3.147	2.256	2.840	2.129	1.710	1.425
	24	2.183	1.638	2.150	1.678	1.239	1.090	2.901	2.130	2.860	2.181	1.694	1.458	2.789	2.044	2.749	2.093	1.622	1.391
	28	2.089	1.583	2.144	1.679	1.212	1.078	2.782	2.061	2.852	2.182	1.658	1.443	2.674	1.978	2.742	2.094	1.587	1.376
	32	1.986	1.521	2.044	1.629	1.199	1.074	2.653	1.984	2.727	2.121	1.641	1.438	2.549	1.903	2.620	2.035	1.570	1.371

Le tableau IV.9 examine l'effet de la variation du module de Young (E_{b11}) du béton armé sur les contraintes interfaciales dans une poutre en béton armé renforcée par une plaque en CFRP. L'analyse est menée sur trois phases de conditions de chargement, chaque phase examinant trois valeurs de module de Young ($E_{b11} = 20000$ MPa, 30000 MPa et 50000 MPa).

Les résultats indiquent une diminution constante de la contrainte de cisaillement interfaciale (τ) et de la contrainte normale (σ) au fur et à mesure que le module de Young augmente, ce qui suggère que les matériaux plus rigides conduisent à des distributions de contraintes plus favorables à l'interface. Parmi les trois conceptions bio-inspirées Hélicoïdal-récurif (HR), Hélicoïdale-exponentielle (HE) et Hélicoïdal-sémi-circulaire (HS), la conception HS présente systématiquement les contraintes interfaciales les plus faibles, tandis que la conception HE présente les contraintes les plus élevées, ce qui implique que la conception HS est la plus efficace pour atténuer les concentrations de contraintes. En outre, l'impact des phases de chargement montre que les contraintes interfaciales augmentent de la phase 1 (charge mécanique uniquement) à la phase 2 (charges mécaniques et thermiques), mais pas toujours de la phase 2 à la phase 3 (charges mécaniques, hygrothermiques), ce qui indique des interactions complexes entre les charges et les propriétés des matériaux qui peuvent influencer la distribution des contraintes. En outre, lorsque la présence de bulle d'air (α) passe de 0 à 0,1, on observe une légère augmentation des contraintes interfaciales dans toutes les conditions, ce qui met en évidence la sensibilité des contraintes interfaciales aux changements des paramètres de chargement. Ces résultats soulignent l'importance de sélectionner des propriétés de matériaux et des conceptions de renforcement appropriées pour optimiser la performance et la durabilité des poutres en béton armé renforcées avec des plaques en CFRP dans diverses conditions de chargement.

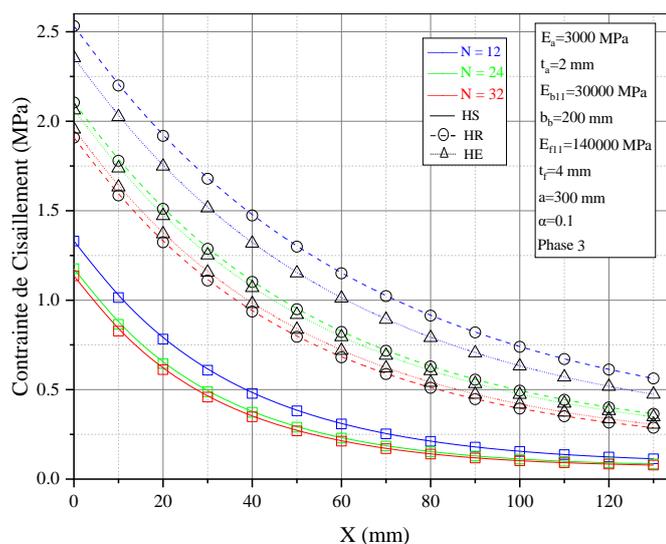
Dans ce qui suit, dans cette section, nous allons détailler tous les paramètres pour mieux appréhender le comportement de l'interface poutre-renfort en utilisant le nouveau matériau bio-inspiré.

Tableau IV.9 : Effet des modules de béton sur les contraintes interfaciales pour le renforcement d'une poutre endommagée à l'aide d'une plaque stratifiée en CFRP (N=32)

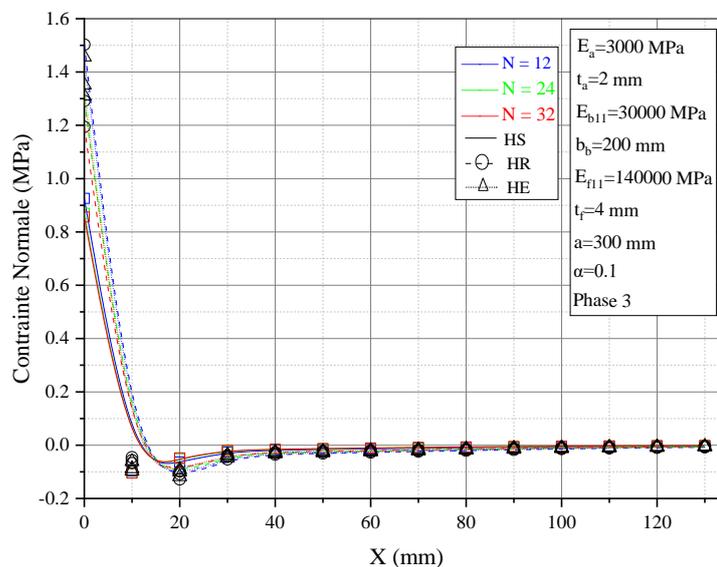
Stage	α	$E_{b11} = 20000 \text{ MPa}$						$E_{b11} = 30000 \text{ MPa}$						$E_{b11} = 50000 \text{ MPa}$					
		HR		HE		HS		HR		HE		HS		HR		HE		HS	
		τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
1	0	1.726	1.085	1.772	1.189	1.024	0.785	1.378	0.860	1.418	0.946	0.802	0.616	1.009	0.620	1.040	0.690	0.589	0.439
	0.05	1.781	1.129	1.826	1.232	1.060	0.812	1.422	0.893	1.461	0.980	0.830	0.637	1.041	0.645	1.072	0.715	0.610	0.455
	0.1	1.834	1.170	1.879	1.274	1.097	0.840	1.466	0.927	1.505	1.015	0.859	0.660	1.075	0.670	1.105	0.742	0.631	0.472
2	0	2.185	1.358	2.235	1.490	1.316	0.997	1.922	1.179	1.972	1.302	1.142	0.856	1.677	1.004	1.719	1.115	1.018	0.725
	0.05	2.232	1.398	2.281	1.528	1.348	1.021	1.954	1.208	2.003	1.330	1.164	0.874	1.696	1.023	1.737	1.134	1.031	0.737
	0.1	2.279	1.436	2.327	1.566	1.382	1.047	1.988	1.237	2.036	1.358	1.188	0.892	1.717	1.044	1.757	1.154	1.044	0.749
3	0	2.117	1.322	2.166	1.449	1.271	0.964	1.839	1.135	1.888	1.252	1.088	0.818	1.573	0.949	1.613	1.053	0.948	0.681
	0.05	2.165	1.362	2.213	1.488	1.304	0.989	1.873	1.164	1.921	1.280	1.111	0.837	1.595	0.969	1.634	1.073	0.963	0.693
	0.1	2.213	1.401	2.261	1.527	1.338	1.016	1.908	1.194	1.955	1.310	1.136	0.856	1.618	0.991	1.656	1.094	0.978	0.706

IV.4.1. Effet du nombre de couches de stratifié

La figure IV.10 illustre l'effet de la variation du nombre de couches de stratifié CFRP sur les contraintes interfaciales dans une poutre en béton armé poreuse dans des conditions de chargement mécanique et charge hygrothermique (Phase 3). L'analyse se concentre sur deux types de contraintes : la contrainte de cisaillement (figure IV.10a) et la contrainte normale (figure IV.10b) pour différents nombres de couches ($N = 12, 24, 32$) et conceptions bio-inspirées (HS, HR, HE).



(a) contrainte de cisaillement



(b) contrainte normale

Figure IV.10 : Effet de différents nombres de couches sur les contraintes interfaciales ($\alpha=0,1$, Phase 3)

Dans la figure IV.10a, la distribution de la contrainte de cisaillement le long de la distance d'extrémité de la plaque (X) montre une tendance à la baisse avec un nombre croissant de

couches. Cette réduction de la contrainte de cisaillement avec un plus grand nombre de couches suggère une meilleure performance de collage et une probabilité réduite d'échecs de décollement. Parmi les conceptions, la configuration HR présente systématiquement les valeurs de contrainte de cisaillement les plus élevées, ce qui indique une distribution de contrainte potentiellement moins uniforme.

En revanche, la configuration HS présente les valeurs de contrainte de cisaillement les plus faibles, ce qui implique une distribution des contraintes plus favorable et de meilleures performances structurelles. La conception HE se situe entre les configurations HS et HR. En outre, toutes les configurations montrent que la contrainte de cisaillement est la plus élevée près de l'extrémité de la plaque et qu'elle diminue à mesure que la distance par rapport à l'extrémité de la plaque augmente, ce qui met en évidence une région critique pour un décollement ou une rupture potentielle.

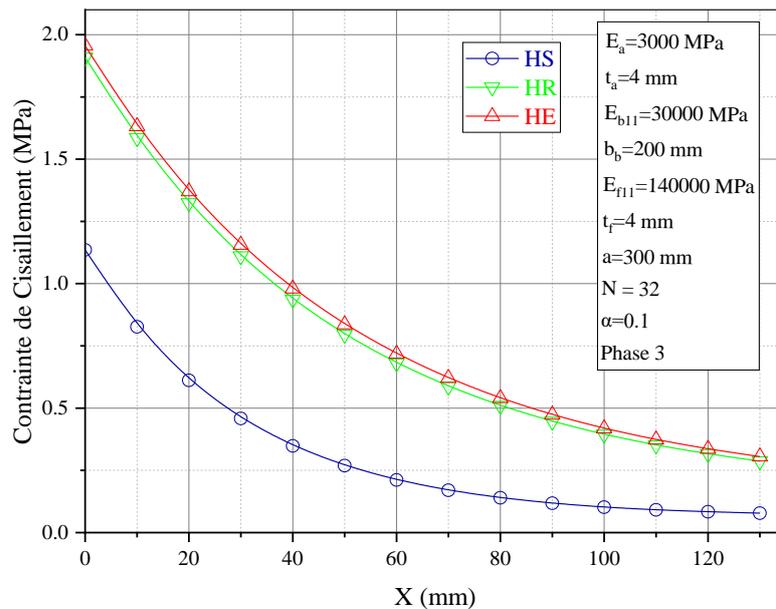
La figure IV.10b montre la distribution de la contrainte normale, qui est relativement peu affectée par le nombre de couches au-delà d'une certaine distance de l'extrémité de la plaque. La contrainte normale diminue rapidement à partir de l'extrémité de la plaque et se stabilise à près de zéro à environ $X=40$ mm, quel que soit le nombre de couches ou la conception. Cependant, près de l'extrémité de la plaque, la conception HR montre à nouveau des valeurs de contrainte normale légèrement plus élevées par rapport à HS et HE, bien que cette différence diminue plus loin le long de la plaque. Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que l'augmentation du nombre de couches de CFRP réduit principalement les contraintes interfaciales, en particulier près de l'extrémité de la plaque.

IV.4.2. Effet de l'orientation des fibres

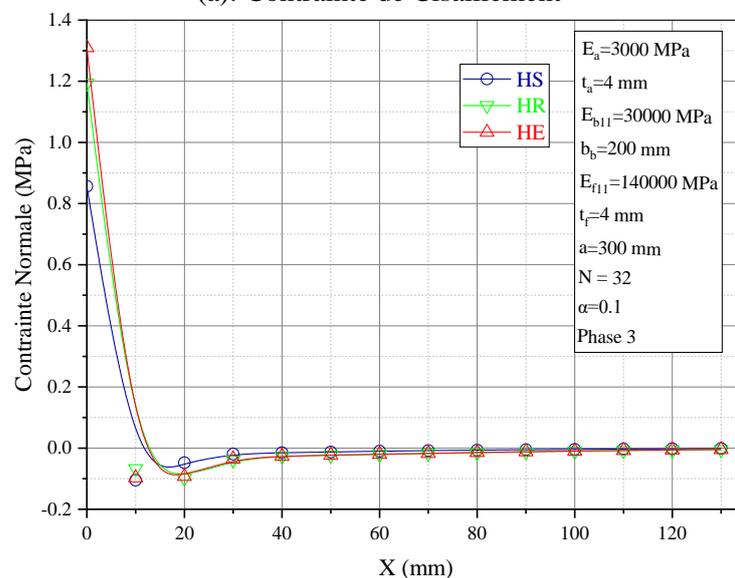
La figure IV.11 présente l'impact de différentes configurations structurelles bio-inspirées sur les contraintes interfaciales dans une poutre en béton armé poreuse renforcée par une plaque CFRP. L'analyse considère deux types de contraintes : la contrainte de cisaillement (Figure IV.11a) et la contrainte normale (Figure IV.11b) dans des conditions de chargement spécifiques avec 32 couches ($N = 32$) et une valeur alpha de 0,1 durant la phase 3.

Dans la figure IV.11a, la distribution de la contrainte de cisaillement le long de la distance depuis l'extrémité de la plaque (X) montre un motif distinctif à travers les différentes configurations. La conception Hélicoïdal-sémi-circulaire (HS) montre systématiquement les valeurs de contrainte de cisaillement les plus faibles, indiquant une meilleure distribution des contraintes et suggérant une performance structurelle améliorée. En contraste, les conceptions

Hélicoïdal-récurif (HR) et Hélicoïdale-exponentielle (HE) présentent des valeurs de contrainte de cisaillement plus élevées, avec HR montrant constamment la plus haute concentration de contrainte. Ceci indique une distribution des contraintes moins uniforme, ce qui pourrait augmenter la probabilité de défaillances par décollement. Toutes les configurations démontrent une diminution de la contrainte de cisaillement avec l'augmentation de la distance depuis l'extrémité de la plaque, soulignant cette zone comme critique pour une éventuelle défaillance.



(a): Contrainte de Cisaillement



(b): Contraintes Normales

Figure IV.11 : Effet de l'orientation des fibres sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA renforcée et soumise aux charges combinées ($N=32$, $\alpha=0,1$, Phase 3)

La figure IV.11b illustre la distribution de la contrainte normale, montrant que la contrainte normale diminue fortement près de l'extrémité de la plaque et se stabilise à des valeurs proches de zéro à environ $X=40$ mm, quelle que soit la configuration. Alors que la conception HR montre

des valeurs de contrainte normale légèrement plus élevées près de l'extrémité de la plaque comparées à HS et HE, cette différence devient négligeable plus loin le long de la poutre. Ces résultats suggèrent que la configuration HS est la plus efficace pour réduire à la fois les contraintes de cisaillement et les contraintes normales, particulièrement près des régions critiques à l'extrémité de la plaque. La réduction globale des contraintes interfaciales, telle qu'indiquée par la conception HS, implique une meilleure performance de liaison et un risque plus faible de décollement, renforçant ainsi l'intégrité structurelle de la poutre en béton armé renforcée.

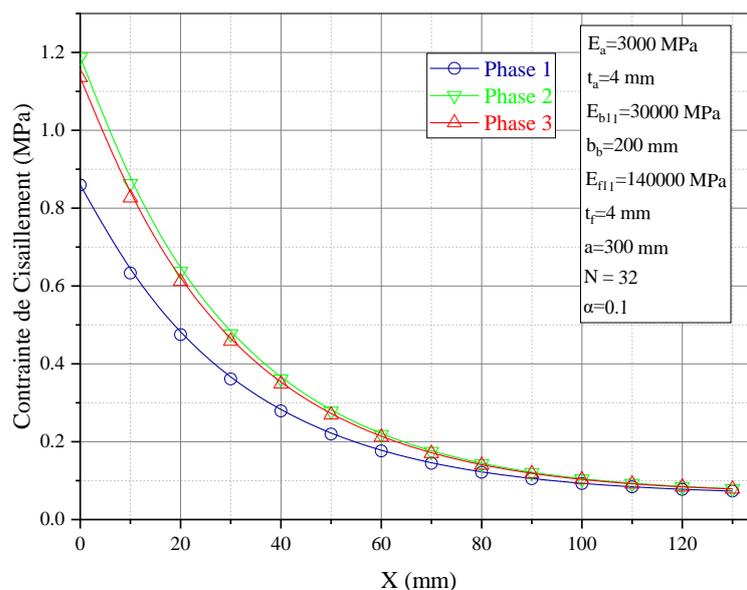
IV.4.3. Effet de la nature du chargement appliqué

Les figures IV.12 présentées fournissent une analyse de l'impact des différentes phases de chargement sur les contraintes interfaciales d'une poutre en béton armé poreuse renforcée avec une plaque en CFRP, en utilisant spécifiquement la configuration hélicoïdale-sémi-circulaire (HS) avec 32 couches ($N = 32$) et une valeur alpha de 0,1.

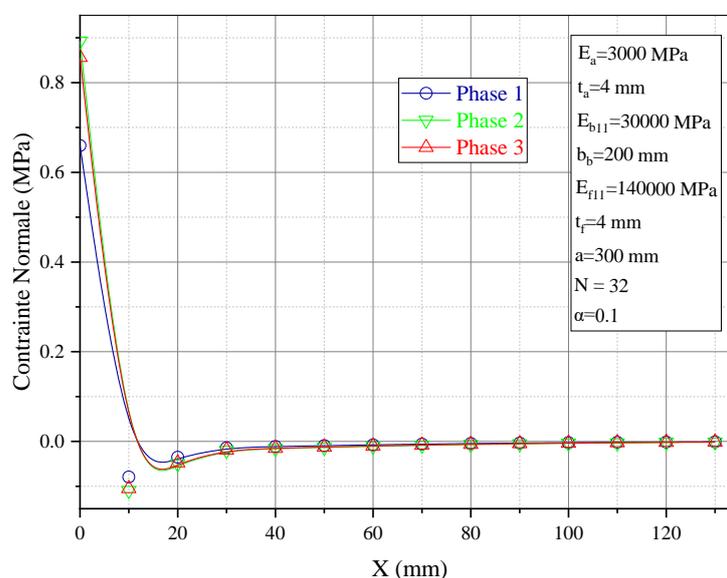
La figure (IV.12a) illustre la distribution de la contrainte de cisaillement le long de la longueur de la poutre (X) pour les trois phases. Il est observé que la phase 2 présente les valeurs de contrainte de cisaillement les plus élevées, suivie de la phase 3, tandis que la phase 1 montre les valeurs les plus basses. Cette tendance indique que l'introduction d'une charge thermique lors de la phase 2 augmente significativement la contrainte de cisaillement, tandis que la charge hygrothermique supplémentaire lors de la phase 3 réduit légèrement la contrainte de cisaillement par rapport à la phase 2. La contrainte de cisaillement diminue avec la distance depuis l'extrémité de la plaque dans toutes les phases, avec les effets les plus prononcés près de l'extrémité de la plaque.

La figure (IV.12b) illustre la distribution des contraintes normales dans les mêmes conditions. Ici, la contrainte normale atteint son maximum près de l'extrémité de la plaque et diminue rapidement à mesure que la distance augmente, les profils pour les phases 2 et 3 étant presque identiques et supérieurs à celui de la phase 1. Cela indique que les charges thermiques et hygrothermiques contribuent de manière similaire à l'augmentation de la contrainte normale, mais que l'ajout d'une charge hygrothermique au stade 3 ne modifie pas de manière significative la distribution de la contrainte normale par rapport au phase 2.

Dans l'ensemble, l'analyse montre que l'introduction de charges thermiques et hygrothermiques affecte considérablement les contraintes interfaciales, en particulier la contrainte de cisaillement, la phase 2 étant la plus critique.



(a): Contraite de Cisaillement



(b): Contraite Normale

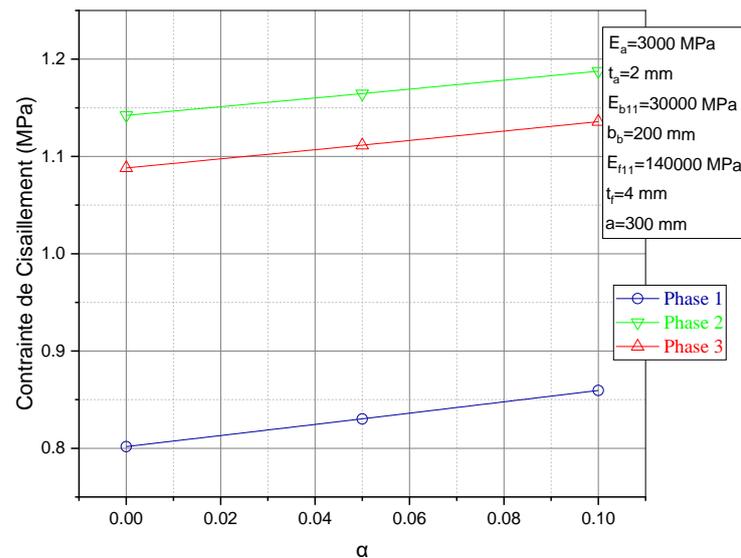
Figure IV.12 : Effet de la variation du type de chargement sur les contraintes interfaciales d'une poutre en BA renforcée (HS, $N = 32$, $\alpha = 0,1$)

IV.4.4. Impact de la porosité à différentes phases de chargement

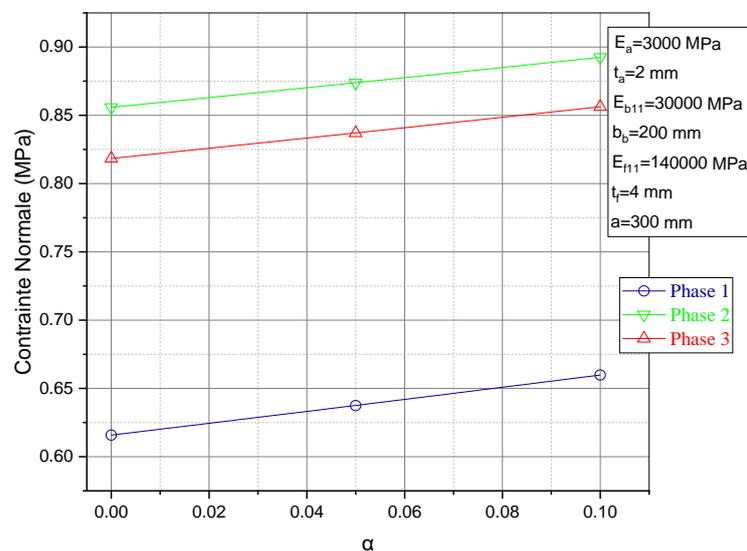
Les figures IV.13 analysent l'effet des pourcentages variables de bulle d'air (α) sur les contraintes interfaciales d'une poutre en béton armé (BA) renforcée avec une plaque en CFRP, utilisant la configuration Hélicoïdal-sémi-circulaire (HS) avec 32 couches ($N = 32$). L'analyse est réalisée sur trois phases de chargement différentes : la Phase 1, qui implique uniquement une charge mécanique ; la Phase 2, qui combine les charges mécaniques et thermiques ; et la Phase 3, qui intègre les charges mécaniques et hygrothermiques.

La figure (IV.13a) présente la contrainte de cisaillement en fonction du pourcentage de bulle d'air (α). Les données révèlent que la contrainte de cisaillement augmente légèrement avec

l'augmentation de α à travers toutes les phases, indiquant que la présence de bulle d'air exacerbe la concentration de contrainte à l'interface. Parmi les phases, la Phase 2 présente les valeurs les plus élevées de contrainte de cisaillement, suivie par la Phase 3, la Phase 1 affichant les valeurs les plus faibles. Ce modèle suggère que la combinaison de charges mécaniques et thermiques dans la Phase 2 conduit à l'augmentation la plus significative de la contrainte de cisaillement, tandis que l'ajout d'une charge hygrothermique dans la Phase 3 atténue légèrement l'effet.



(a): Contrainte de Cisaillement



(b): Contrainte Normale

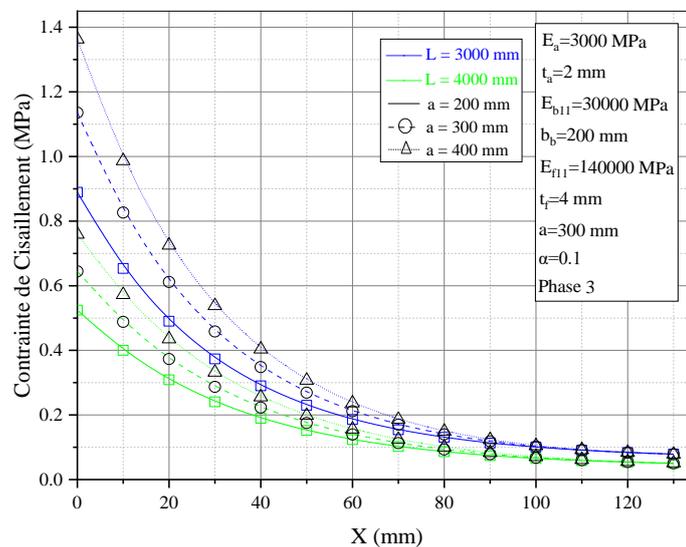
Figure IV.13 : Impact du pourcentage de bulles d'air à différentes phases sur les contraintes interfaciales (HS, N=32)

La figure (IV.13b) illustre la réponse de la contrainte normale à la variation de α . De manière similaire à la contrainte de cisaillement, la contrainte normale montre également une tendance à l'augmentation avec des pourcentages plus élevés de bulle d'air, mais le taux d'augmentation est moins prononcé. Encore une fois, la Phase 2 enregistre les valeurs les plus

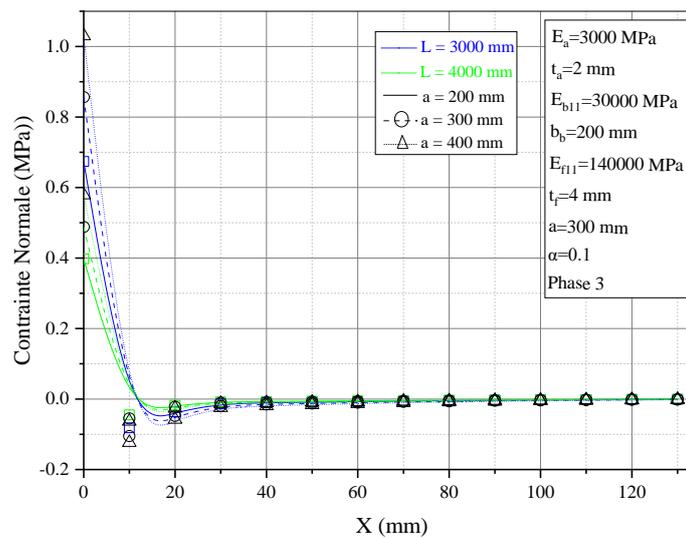
élevées de contrainte normale, suivie par la Phase 3 et la Phase 1. Cela suggère que les bulle d'air ont un impact constant, sur la contrainte normale à travers différentes phases de chargement, avec des conditions thermiques et hygrothermiques contribuant à un niveau de contrainte de base plus élevé.

IV.4.5. Effet de la longueur de la poutre en BA

Les figures IV.14 analysent l'influence de la longueur (L) de la poutre en béton armé (BA) et de la distance du support à l'extrémité de la plaque (a) sur les contraintes interfaciales dans une poutre en BA renforcée avec une plaque en CFRP. L'analyse utilise la configuration hélicoïdale-sémi-circulaire (HS) avec 32 couches (N = 32), dans les conditions de $\alpha = 0.1$ et de chargement de la phase 3.



(a): Contrainte de Cisaillement



(b): Contrainte Normale

Figure IV.14 : Effet de la longueur de la poutre en BA sur les contraintes interfaciales (HS, N=32, $\alpha = 0,3$, Phase3)

La figure (IV.14a) présente la distribution de la contrainte de cisaillement le long de la longueur de la poutre pour différentes longueurs de poutre ($L = 3000$ mm et $L = 4000$ mm) et différentes distances du support à l'extrémité de la plaque ($a = 200$ mm, 300 mm, et 400 mm). Les résultats indiquent que l'augmentation de la longueur de la poutre et de la distance "a" conduit généralement à des valeurs de contrainte de cisaillement plus élevées près de l'extrémité de la plaque, les contraintes diminuant à mesure que la distance depuis l'extrémité de la plaque augmente. Plus précisément, pour les poutres plus longues ($L = 4000$ mm), la contrainte de cisaillement est considérablement plus élevée par rapport aux poutres plus courtes ($L = 3000$ mm). Cette tendance suggère que les poutres plus longues et les plus grandes distances du support amplifient la concentration de contrainte près de l'extrémité de la plaque, ce qui pourrait augmenter la probabilité de décollement à ces points critiques.

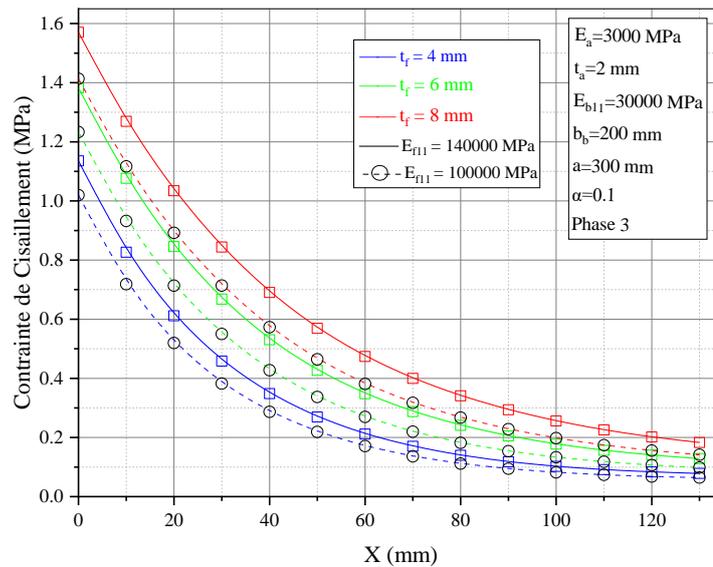
La figure (IV.14b) illustre la distribution de la contrainte normale dans les mêmes conditions. De manière similaire à la contrainte de cisaillement, la contrainte normale est la plus élevée près de l'extrémité de la plaque et diminue rapidement à mesure que la distance depuis l'extrémité de la plaque augmente, pour finalement se stabiliser près de zéro. La contrainte normale est plus prononcée dans les poutres plus longues, les contraintes les plus élevées étant observées pour $L = 4000$ mm et $a = 400$ mm. Cependant, à mesure que la distance depuis l'extrémité de la plaque augmente, les différences entre les différentes longueurs de poutre et distances deviennent négligeables, indiquant que l'effet de ces paramètres est le plus critique près de l'extrémité de la plaque.

IV.4.6. Effet du module d'Young de la plaque

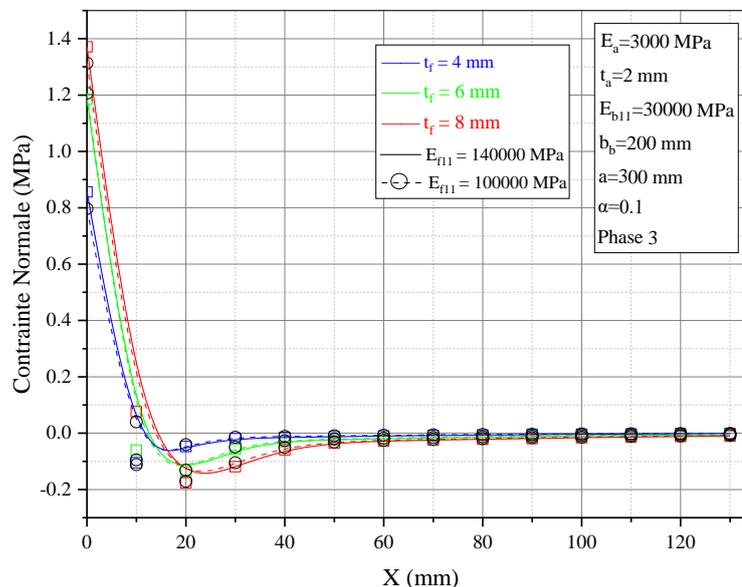
Les figures IV.15 analysent l'effet combiné des propriétés du matériau de la plaque, spécifiquement le module de Young (E_{f11}), et de l'épaisseur (t_f) de la plaque en CFRP sur les contraintes interfaciales dans une poutre en béton armé poreuse. La poutre est renforcée en utilisant la configuration Hélicoïdal-sémicirculaire (HS) avec 32 couches ($N = 32$) dans les conditions de $\alpha = 0.1$ et de chargement de la phase 3.

La figure (IV.15a) présente la distribution de la contrainte de cisaillement le long de la longueur de la poutre pour différentes épaisseurs de plaque ($t_f = 4$ mm, 6 mm, et 8 mm) et deux valeurs de module de Young ($E_{f11} = 100000$ MPa et 140000 MPa). Les données montrent que l'augmentation de l'épaisseur de la plaque et du module de Young entraîne une augmentation de la contrainte de cisaillement à l'interface. La plaque la plus épaisse ($t_f = 8$ mm) combinée avec le module de Young le plus élevé ($E_{f11} = 140000$ MPa) résulte en la contrainte de cisaillement

maximale, tandis que la plaque la plus mince ($t_f = 4$ mm) avec le module de Young le plus faible ($E_{f11} = 100000$ MPa) produit la contrainte de cisaillement la plus basse. La contrainte de cisaillement diminue progressivement à mesure que la distance depuis l'extrémité de la plaque augmente, mais les différences de contrainte entre les différentes combinaisons d'épaisseur et de propriétés matérielles sont plus prononcées près de l'extrémité de la plaque, diminuant progressivement le long de la poutre.



(a): Contrainte de Cisaillement



(b): Contrainte Normale

Figure IV.15 : Effet de l'épaisseur et du module d'Young de la plaque sur les contraintes interfaciales (HS, N=32, $\alpha = 0,1$, Phase 3)

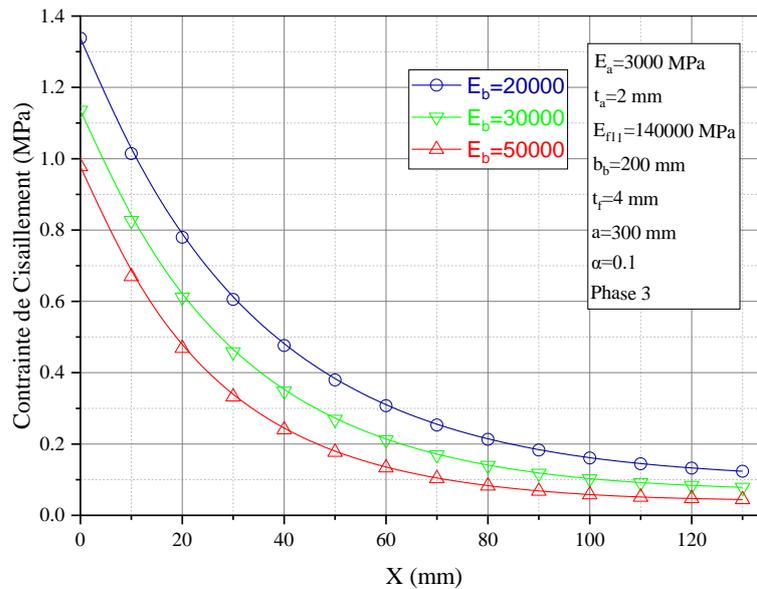
La figure (IV.15b) illustre la distribution de la contrainte normale pour les mêmes épaisseurs de plaque et valeurs de module de Young. De manière similaire à la contrainte de cisaillement, la contrainte normale est la plus élevée près de l'extrémité de la plaque et diminue rapidement à mesure que la distance depuis l'extrémité de la plaque augmente. La plaque la plus épaisse ($t_f = 8$ mm) avec le module de Young le plus élevé ($E_{f11} = 140000$ MPa) montre à nouveau le pic le plus élevé de contrainte normale, en particulier près de l'extrémité de la plaque. Au-delà d'environ 20 mm de l'extrémité de la plaque, la contrainte normale se stabilise près de zéro, et les différences entre les différentes épaisseurs de plaque et module de Young deviennent négligeables, indiquant que l'influence de ces paramètres est la plus critique près de l'extrémité de la plaque où le risque de décollement est le plus élevé.

IV.4.7. Effet du module d'Young de la poutre

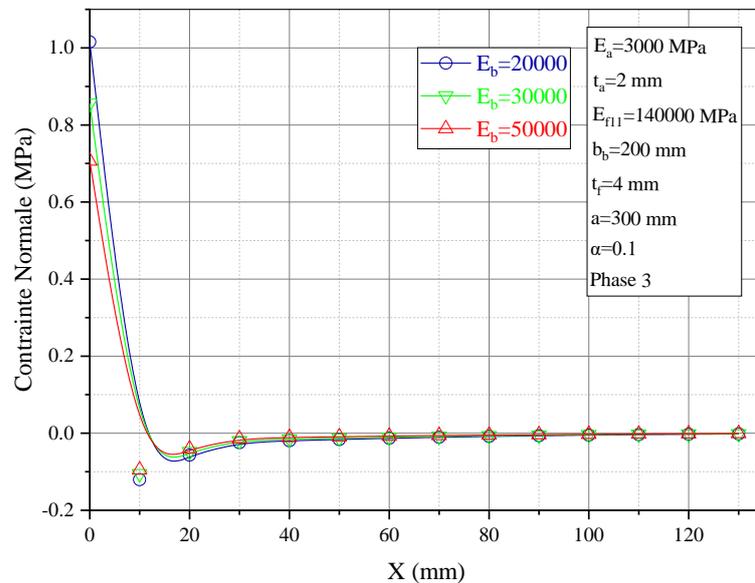
Les figures IV.16 analysent l'impact des valeurs variables du module d'Young du béton armé sur les contraintes interfaciales dans une poutre en béton armé poreuse. La poutre est renforcée en utilisant la configuration hélicoïdale-hémicirculaire (HS) avec 32 couches ($N = 32$) dans les conditions de $\alpha = 0,1$ et de la phase 3 de chargement.

La figure (IV.16a) montre la distribution de la contrainte de cisaillement le long de la longueur de la poutre (X) pour différentes valeurs du module de Young du béton armé ($E_b = 20000$ MPa, 30000 MPa et 50000 MPa). Il est évident que lorsque le module de Young augmente, la contrainte de cisaillement le long de la poutre diminue de manière significative. Le graphique démontre que le module le plus élevé ($E_b = 50000$ MPa) entraîne la contrainte de cisaillement la plus faible, suggérant qu'une base de béton armé plus rigide peut distribuer plus efficacement les charges appliquées et réduire les concentrations de contrainte qui pourraient autrement conduire à un décollement à l'interface poutre-CFRP.

La figure (IV.16b) illustre la distribution de la contrainte normale à travers la poutre pour le même ensemble de valeurs du module de Young. Comme pour la contrainte de cisaillement, il y a une diminution marquée de la contrainte normale à mesure que le module augmente. Les valeurs de contrainte normale près du support sont considérablement réduites dans les poutres avec un module plus élevé, et se stabilisant rapidement à mesure que la distance depuis le support augmente. Pour toutes les valeurs du module, la contrainte normale se normalise et devient presque nulle à plus de 40 mm.



(a): Contrainte de Cisaillement



(b): Contrainte normale

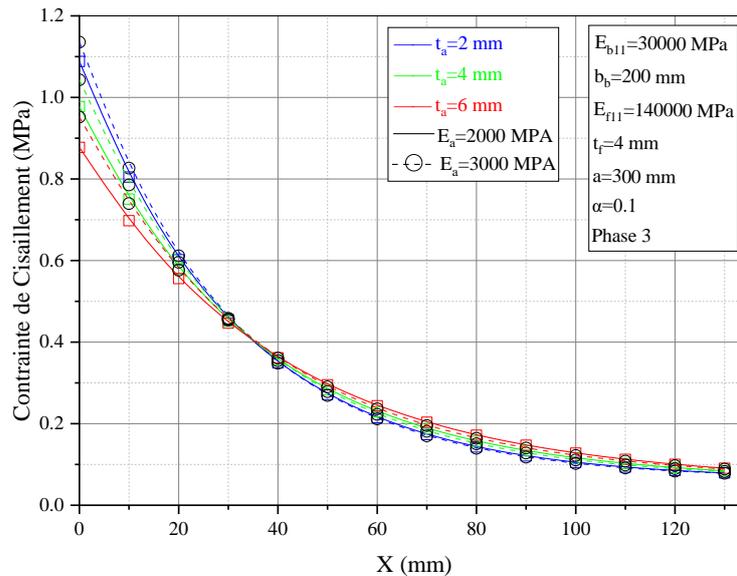
Figure IV.16 : Effet de module de Young de la poutre sur les contraintes interfaciales (HS, N=32, $\alpha = 0,1$, Phase 3)

IV.4.8. Effet des propriétés de l'adhésif

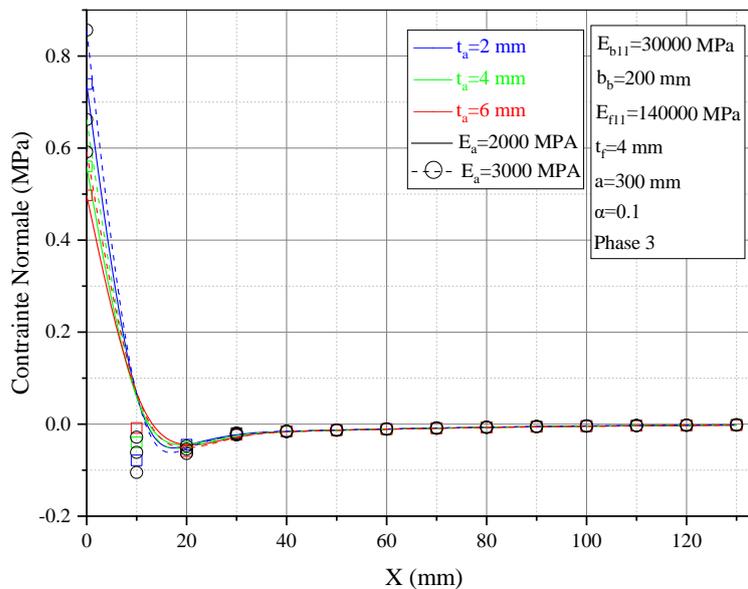
Les figures IV.17 analysent l'effet de l'épaisseur de l'adhésif (t_a) et du module de Young de l'adhésif (E_a) sur les contraintes interfaciales dans une poutre en béton armé poreuse. La poutre est renforcée avec une plaque en CFRP avec une configuration Hélicoïdal-Semi-circulaire (HS), comprenant 32 couches ($N = 32$) dans les conditions de $\alpha = 0.1$ pendant la phase 3 de chargement.

La figure (IV.17a) présente la distribution de la contrainte de cisaillement le long de la longueur de la poutre (X) pour différentes épaisseurs d'adhésif ($t_a = 2$ mm, 4 mm et 6 mm) et des

valeurs du module de Young ($E_a = 2000$ MPa et 3000 MPa). Les données indiquent que l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif conduit généralement à une diminution de la contrainte de cisaillement à l'interface, la couche d'adhésif la plus mince ($t_a = 2$ mm) produisant les valeurs de contrainte de cisaillement les plus élevées. Cette tendance est constante pour les deux valeurs de module, bien que l'effet de l'épaisseur de l'adhésif soit plus prononcé avec un module plus élevé ($E_a = 3000$ MPa). La contrainte de cisaillement diminue progressivement le long de la longueur de la poutre.



(a): Contrainte de Cisaillement



(b): Contrainte Normale

Figure IV.17 : Effet de l'épaisseur et du module d'Young de l'adhésif sur les contraintes interfaciales (HS, N=32, $\alpha = 0,1$, Phase 3)

La figure (IV.17b) illustre la distribution de la contrainte normale pour les mêmes épaisseurs d'adhésif et modules de Young. Comme pour la contrainte de cisaillement, la contrainte normale est la plus élevée près de l'extrémité de la plaque et diminue rapidement à mesure que la distance depuis l'extrémité de la plaque augmente. La couche d'adhésif la plus mince ($t_a = 2$ mm) avec le module supérieur ($E_a = 3000$ MPa) montre le pic le plus élevé de contrainte normale, en particulier près de l'extrémité de la plaque. Cependant, au-delà d'environ 20 mm de l'extrémité de la plaque, les différences entre les configurations deviennent négligeables et la contrainte normale se stabilise près de zéro dans tous les cas.

IV.5. Conclusion

Dans cette étude, nous avons étudié la prédiction des contraintes interfaciales dans les poutres en béton armé (BA) avec des bulles d'air simplement appuyées, renforcées avec une plaque en polymère renforcé de fibres (FRP) de conception hélicoïdale bio-inspirée. En utilisant les réseaux de neurones artificiels (RNA) comme outil prédictif, nous avons pu estimer avec précision les contraintes de cisaillement et normales à l'interface entre les plaques de FRP et la poutre en béton, sous différentes charges mécaniques, thermiques et hygrothermiques, et nous avons développé un modèle numérique via l'Abaqus. Les résultats montrent que le modèle RNA a pu estimer avec précision les distributions de contraintes et a démontré une forte concordance avec le modèle numérique, validant ainsi la robustesse des RNA dans la modélisation des comportements structurels complexes.

Ce modèle élément finis a permis de mettre en évidence l'évolution des contraintes de décollement au niveau des deux interfaces de l'adhésif, contrairement aux modèles analytiques qui considèrent que les contraintes d'interface restent constantes à travers l'épaisseur de l'adhésif.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Ce travail de recherche s'est concentré sur l'application des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour prédire les contraintes interfaciales dans les poutres en béton armé renforcées par des plaques composites innovantes, bio-inspirées. Ces matériaux bio-inspirés, dont la conception s'inspire des structures naturelles comme les coquilles de mollusques, ont montré des avantages notables. Ils permettent une meilleure dissipation des contraintes et améliorent la résistance aux fissures et aux chocs, offrant ainsi une solution durable et innovante pour le renforcement des infrastructures. Cette approche s'inscrit dans un contexte où les infrastructures vieillissantes nécessitent des techniques de réhabilitation et de renforcement plus efficaces pour assurer leur pérennité et leur sécurité.

L'utilisation de polymères renforcés de fibres (FRP), combinés aux plaques bio-inspirées, a permis de démontrer des avantages substantiels par rapport aux méthodes traditionnelles, notamment en termes de légèreté, de résistance mécanique, et de durabilité face à la corrosion. Cependant, la durabilité et l'efficacité des renforts dépendent principalement du comportement de l'interface entre la plaque FRP et le béton. Les plaques bio-inspirées, grâce à leur configuration hélicoïdale unique, ont contribué à mieux répartir les contraintes interfaciales, réduisant ainsi les risques de délaminage, problème fréquemment rencontré avec les plaques traditionnelles.

Pour mieux comprendre ces phénomènes, un modèle analytique a été développé pour simuler les effets hygro-thermo-mécaniques dans les poutres renforcées par des matériaux bio-inspirés. Ce modèle, prenant en compte divers paramètres tels que les propriétés des matériaux, la géométrie des structures et les conditions de chargement, a permis de prédire avec précision la distribution des contraintes normales et de cisaillement à l'interface FRP-béton. Les résultats ont montré que les plaques bio-inspirées améliorent la stabilité structurelle et augmentent la résistance globale des poutres.

En parallèle, nous avons développé un modèle RNA pour prédire ces contraintes interfaciales. Ce modèle, entraîné sur un large ensemble de données issues du modèle analytique et de la littérature, a démontré une excellente concordance avec les données expérimentales, validant ainsi l'efficacité de cette approche pour des prédictions précises et fiables. L'ajout des plaques bio-inspirées dans ce modèle a permis d'optimiser encore davantage la distribution des contraintes et d'améliorer les performances globales des renforts.

Et pour valider ce modèle, on a développé un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis via Abaqus. Ce modèle numérique a permis de mettre en lumière l'évolution des contraintes de décollement au niveau des interfaces adhésives, contrairement aux modèles

analytiques qui considèrent les contraintes comme constantes à travers l'épaisseur de l'adhésif. Ce modèle a également permis de comparer les distributions de contraintes obtenues par RNA et les résultats numériques, confirmant ainsi la fiabilité du modèle RNA pour la modélisation de comportements structurels complexes.

L'étude paramétrique réalisée à l'aide du modèle RNA a mis en lumière plusieurs observations importantes, notamment :

- Les plaques bio-inspirées réduisent significativement les contraintes interfaciales par rapport aux plaques traditionnelles, en particulier dans des conditions de chargement hygrothermiques sévères.
- La longueur des poutres et la configuration spécifique des plaques bio-inspirées influencent fortement la distribution des contraintes, les configurations hélicoïdales-semi-circulaires se révélant particulièrement efficaces.
- L'augmentation du nombre de couches de FRP, associée à la rigidité améliorée des plaques bio-inspirées, diminue les concentrations de contraintes.
- La combinaison de matériaux bio-inspirés avec des adhésifs performants et des plaques rigides optimise les performances globales du renforcement.

Ces résultats soulignent l'importance de la conception minutieuse des systèmes de renforcement, en intégrant les avantages des matériaux bio-inspirés, pour optimiser la performance et la durabilité des infrastructures. Le modèle RNA, combiné aux plaques bio-inspirées, offre une méthode prometteuse pour améliorer la précision des prédictions et optimiser la conception des renforts.

Cette recherche ouvre également la voie à des développements futurs, notamment l'intégration de données expérimentales supplémentaires pour affiner les modèles existants, et l'exploration de nouvelles configurations bio-inspirées adaptées à divers types de structures et de conditions de chargement. Ces perspectives permettront non seulement de renforcer la sécurité et la résilience des infrastructures en béton armé, mais aussi d'améliorer leur longévité.

En conclusion, ce travail a démontré l'apport significatif des matériaux composites bio-inspirés, combinés aux réseaux de neurones artificiels, pour la prédiction des contraintes interfaciales et le renforcement des structures. Cette approche novatrice, soutenue par une analyse approfondie des interactions mécaniques, constitue une avancée importante vers des solutions de renforcement plus fiables, durables et adaptées aux défis des infrastructures modernes.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Tounsi A. Improved theoretical solution for interfacial stresses in concrete beams strengthened with FRP plate. *International Journal of Solids and Structures*. 2006;43(14):4154-74.
- [2] Al-Emrani M, Kliger R. Analysis of interfacial shear stresses in beams strengthened with bonded prestressed laminates. *Composites Part B: Engineering*. 2006;37(4):265-72.
- [3] Deng J, Lee MMK. Behaviour under static loading of metallic beams reinforced with a bonded CFRP plate. *Composite Structures*. 2007;78(2):232-42.
- [4] Xue Y-J, Wang W-W, Tian J, Wu Z-H. Experimental study and analysis of RC beams shear strengthened with FRP/SMA composites. *Structures*. 2023;55:1936-48.
- [5] Rabinovitch O, Frostig Y. Experiments and analytical comparison of RC beams strengthened with CFRP composites. *Composites Part B: Engineering*. 2003;34(8):663-77.
- [6] Mukhtar FM, Shehadah ME. Shear behavior of flexural CFRP-strengthened RC beams with crack-induced delamination: Experimental investigation and strength model. *Composite Structures*. 2021;268.
- [7] Deng J, Li J, Zhu M. Fatigue behavior of notched steel beams strengthened by a prestressed CFRP plate subjected to wetting/drying cycles. *Composites Part B: Engineering*. 2022;230.
- [8] Hawileh R, Abdalla J, Naser M. Modeling the shear strength of concrete beams reinforced with CFRP bars under unsymmetrical loading. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2019;26(15):1290-7.
- [9] Tounsi A. Improved theoretical solution for interfacial stresses in concrete beams strengthened with FRP plate. *International Journal of Solids and Structures*. 2006;43(14-15):4154-74.
- [10] Greco F, Lonetti P, Blasi PN. An analytical investigation of debonding problems in beams strengthened using composite plates. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007;74(3):346-72.
- [11] Yang J, Wu YF. Interfacial stresses of FRP strengthened concrete beams: Effect of shear deformation. *Composite Structures*. 2007;80(3):343-51.
- [12] Li L-j, Guo Y-c, Huang P-y, Liu F, Deng J, Zhu J. Interfacial stress analysis of RC beams strengthened with hybrid CFS and GFS. *Construction and Building Materials*. 2009;23(6):2394-401.
- [13] Narayanamurthy V, Chen JF, Cairns J, Ramaswamy A. Effect of shear deformation on interfacial stresses in plated beams subjected to arbitrary loading. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2011;31(8):862-74.
- [14] Ghafoori E, Motavalli M. Flexural and interfacial behavior of metallic beams strengthened by prestressed bonded plates. *Composite Structures*. 2013;101:22-34.
- [15] Kim N, Shin YS, Choi E, Kim HS. Relationships between interfacial shear stresses and moment capacities of RC beams strengthened with various types of FRP sheets. *Construction and Building Materials*. 2015;93:1170-9.
- [16] Berrezoug MhB, Belakhdar K, Tounsi A, Adda Bedia EA. Finite element analysis of initially damaged beams repaired with FRP plates. *Composite Structures*. 2015;134:429-39.

- [17] Daouadji TH. Analytical and numerical modeling of interfacial stresses in beams bonded with a thin plate. *Advances in Computational Design*. 2017;2(1):57-69.
- [18] Thomas J, Ramadass S. Prediction of the load and deflection response of concrete deep beams reinforced with FRP bars. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2021;28(1):43-66.
- [19] Liu M, Dawood M. A closed-form solution of the interfacial stresses and strains in steel beams strengthened with externally bonded plates using ductile adhesives. *Engineering Structures*. 2018;154:66-77.
- [20] Du Y, Liu Y, Zhou F. An improved four-parameter model on stress analysis of adhesive layer in plated beam. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2019;91:1-11.
- [21] Zhang X, Wu J, Fan Z, Yang S, Huang F, Wang A. Cohesive shear stress and strength prediction of composite patch bonded to metal reinforcement. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2019;90:144-53.
- [22] Long H, Wei Y, Liang L. A rigorous analytical solution of interfacial stresses and overall stiffness of beam structures bonded with partially covered plates. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;167.
- [23] Van Pham P. Solutions of the interfacial shear and normal stresses in plate flexural-strengthened beams based on different complementary strain energy assumptions. *Engineering Structures*. 2021;229.
- [24] Deng J, Li X, Wang Y, Xie Y, Huang C. RC beams strengthened by prestressed CFRP plate subjected to sustained loading and continuous wetting condition: Flexural behaviour. *Construction and Building Materials*. 2021;311.
- [25] Li J, Zhu M, Deng J. Flexural behaviour of notched steel beams strengthened with a prestressed CFRP plate subjected to fatigue damage and wetting/drying cycles. *Engineering Structures*. 2022;250.
- [26] Guo D, Zhou H, Wang H-P, Dai J-G. Effect of temperature variation on the plate-end debonding of FRP-strengthened steel beams: Coupled mixed-mode cohesive zone modeling. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022;270.
- [27] Guo R, Xian G, Li C, Huang X, Xin M. Effect of fiber hybridization types on the mechanical properties of carbon/glass fiber reinforced polymer composite rod. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2022;29(27):6288-300.
- [28] Shen J, Arruda MT, Pagani A, Carrera E. A regularized higher-order beam elements for damage analysis of reinforced concrete beams. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2023:1-13.
- [29] Zhang N, Gu X, Hou W. Analysis of Interfacial Mechanical Properties of Steel Beams Strengthened with CFRP Sheets under Temperature and Creep. *Polymers (Basel)*. 2022;14(12).
- [30] Calabrese AS, Colombi P, D'Antino T. Analytical solution of the full-range behavior of adhesively bonded FRP-steel joints made with toughened adhesives. *Engineering Fracture Mechanics*. 2023;292.

- [31] Li G, Zhang A, Jin W, Xiao Y, Li H. A new flexural strength model of CFRP-strengthened RC beams with intermediate crack induced debonding failure. *Composite Structures*. 2023;308.
- [32] Zhang J, Guan Y, Fan C, Cao G, Liu J. Experimental and theoretical investigations on the damage evolution of the basalt fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*. 2024;422:135703.
- [33] Zeng W, Zhao X, Zou B, Chen C. Topographical characterization and permeability correlation of steel fiber reinforced concrete surface under freeze-thaw cycles and NaCl solution immersion. *Journal of Building Engineering*. 2023;80:108042.
- [34] Zhang R, Long Z, Long G, Wang J, Wang X, Zhang X, et al. Mechanism of graphene oxide concrete macro-micro properties evolution under large temperature difference freeze-thaw action. *Construction and Building Materials*. 2024;415:135019.
- [35] Torero JL, Quintiere JQ, Steinhaus T. Fire safety in high-rise buildings, lessons learned from the wtc. 2002.
- [36] Mróz K, HAGER I. Assessment of spalling risk in concrete subjected to fire, Thèse de 2020.
- [37] Miao Y, Wang H, Zhang Y, Feng T, Yali L, Liqun L, et al. A numerical model for predicting the drying shrinkage behavior of concrete under ultra-low relative humidity. *Construction and Building Materials*. 2024;411:134459.
- [38] Liu J, Tian Q, Wang Y, Li H, Xu W. Evaluation method and mitigation strategies for shrinkage cracking of modern concrete. *Engineering*. 2021;7(3):348-57.
- [39] Zhao H, Liu J, Yin X, Wang Y, Huang D. A multiscale prediction model and simulation for autogenous shrinkage deformation of early-age cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2019;215:482-93.
- [40] Han Y, Xie Y, Li W, Yue Q, Liu Y, Peng B. Using SAP to control the deformation of shrinkage-compensating concretes at early age. *Construction and Building Materials*. 2024;416:135139.
- [41] Rezvani M, Proske T, Graubner C-A. Modelling the drying shrinkage of concrete made with limestone-rich cements. *Cement and concrete research*. 2019;115:160-75.
- [42] Lu T, Li Z, van Breugel K. Modelling of autogenous shrinkage of hardening cement paste. *Construction and Building Materials*. 2020;264:120708.
- [43] Masoudi Nejad R, Gholami A. Fatigue crack growth and microstructural analysis of rail steel specimens under periodic overloads. *Materials Today Communications*. 2024;39:108592.
- [44] Tian J, Sun Q, Zhai D, Wang L, Ding H, Mi B, et al. Fatigue properties of polyurethane concrete expansion joint anchorage zone. *Case Studies in Construction Materials*. 2024;20:e02882.
- [45] Jia M, Wu Z, Jiang X, Yu RC, Zhang X, Wang Y. Modified Paris law for mode I fatigue fracture of concrete based on crack propagation resistance. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2024;131:104383.

- [46] Ren J, Song J, Ellingwood BR. Reliability assessment framework of deteriorating reinforced concrete bridges subjected to earthquake and pier scour. *Engineering Structures*. 2021;239:112363.
- [47] Doğruyol M. Characterisation of acrylic copolymer treated concretes and concretes of reinforced concrete buildings collapsed in the 6 February 2023 Mw = 7.8 Kahramanmaraş (Türkiye) earthquake. *Engineering Failure Analysis*. 2024;161:108249.
- [48] Sung Y, Chang D, Cheng M, Chang T, Liu K. Enhancing the structural longevity of the bridges with insufficient seismic capacity by retrofitting. *Structural Longevity*. 2009;1(1):1-16.
- [49] Calgaro J-A, Lacroix R. *Maintenance et réparation des ponts: Book, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées*; 1997.
- [50] Vintz Z, Mañas P, Vala M. Evaluation of the effects of high speed truck crash into a bridge column. *Proceedings of the 6th International Conference on Mechanics and Materials in Design (M2D2015)*. p. 1025-36.
- [51] Kuhlmann U, Bove S, Breunig S, Drebenstedt K. Fatigue of steel bridges. *Proceedings 12th international conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures - ASCCS 2018*. 2018.
- [52] Al-Negheimish AI, Al-Zaid RZ. Effect of manufacturing process and rusting on the bond behavior of deformed bars in concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2004;26(6):735-42.
- [53] Wang L, Jian Q, Zhan S, Song Y, Ruan S. Chloride-induced corrosion patterns of reinforcements in simulated pore solutions of calcium sulfoaluminate cement concrete: An analytical study. *Journal of Building Engineering*. 2024;82:108189.
- [54] Wang D, Han L, Kang M, Wan M, Ju Y. Influence of corrosion on the bond performance of reinforcements and basalt fibre high strength concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;17:e01394.
- [55] Lacombe C, Vidal T, Sellier A, Noret C, Anthinac P. Compressive creep of a concrete affected by advanced alkali-aggregate reaction. *Construction and Building Materials*. 2024;421:135627.
- [56] Bonic Z, Toplicic-Curcic G, Davidović N, Jelena S. Damage of Concrete and Reinforcement of Reinforced-Concrete Foundations Caused by Environmental Effects. *Procedia Engineering*. 2015;117:416-23.
- [57] Zhuang Z, Mu S, Guo Z, Liu G, Zhang J, Miao C. Diffusion-reaction models for concrete exposed to chloride-sulfate attack based on porosity and water saturation. *Cement and Concrete Composites*. 2024;146:105378.
- [58] Khelil N. *Traitements électrochimiques des bétons atteints de réaction sulfatique interne*, Thèse de Doctorat, Toulouse 3; 2014.
- [59] Collepardi M. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. *Cement and concrete Composites*. 2003;25(4-5):401-7.

- [60] Huet B. Comportement à la corrosion des armatures dans un béton carbonaté. Influence de la chimie de la solution interstitielle et d'une barrière de transport, Thèse de Doctorat, INSA Lyon; 2005.
- [61] Hossain MA, Chowdhury SR, Anik MFR. Study on carbonation of low strength concrete made of brick aggregate. *Case Studies in Construction Materials*. 2024;20:e03073.
- [62] Sabareanu E. Assessment and Rehabilitation Issues Concerning Existing 70's Structural Stock. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;209:012100.
- [63] Gkournelos P, Bournas D, Triantafillou T. Combined seismic and energy upgrading of existing buildings using advanced materials: Case studies on Reinforced Concrete Buildings in South Europe: Book, 2019.
- [64] Barnes RA, Mays GC. Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates: Part 1 – Experimental programme. *Construction and Building Materials*. 2006;20(6):396-402.
- [65] Liu G, Zhao J, Zhang Z, Wang C, Xu Q. Mechanical Properties and Microstructure of Shotcrete under High Temperature. *Applied Sciences*. 2021;11(19):9043.
- [66] Towsyfyhan H, Biguri A, Boardman R, Blumensath T. Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2020;33(3):771-91.
- [67] Feraboli P, Masini A. Development of carbon/epoxy structural components for a high performance vehicle. *Composites Part B: Engineering*. 2004;35(4):323-30.
- [68] Kossakowski PG, Wciślik W. Fiber-reinforced polymer composites in the construction of bridges: Opportunities, problems and challenges. *Fibers*. 2022;10(4):37.
- [69] Dumont F, Weimer C, Soulat D, Launay J, Chatel S, Maison-Le-Poec S. Composites Preforms Simulations for Helicopters Parts. *International Journal of Material Forming*. 2008;1(1):847-50.
- [70] Rajak DK, Pagar DD, Menezes PL, Linul E. Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. *Polymers*. 2019;11(10):1667.
- [71] Yashchuk M, Smerdov D. Reinforced concrete elements strengthened by pre-stressed fibre-reinforced polymer (FRP). *Transportation Research Procedia*. 2021;54:157-65.
- [72] Michels J, Sena-Cruz J, Czaderski C, Motavalli M. Structural strengthening with prestressed CFRP strips with gradient anchorage. *Journal of Composites for Construction*. 2013;17(5):651-61.
- [73] Harle SM. Durability and long-term performance of fiber reinforced polymer (FRP) composites: A review. *Structures*. 2024;60:105881.
- [74] Zhang F, Gao L, Wu Y-F, Liu J. Flexural design of reinforced concrete structures strengthened with hybrid bonded FRP. *Composite Structures*. 2021;269:113996.
- [75] Teng J, Lam L, Chen J. Shear strengthening of RC beams with FRP composites. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2004;6(3):173-84.

- [76] Rabinovitch O, Frostig Y. Delamination failure of RC beams strengthened with FRP strips—A closed-form high-order and fracture mechanics approach. *Journal of Engineering Mechanics*. 2001;127(8):852-61.
- [77] Tounsi A, Benyoucef S. Interfacial stresses in externally FRP-plated concrete beams. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2007;27(3):207-15.
- [78] Kermiche S, Redjel B. Analyse expérimentale et analytique du comportement en flexion des poutres en béton armé préfissurées renforcées par un matériau composite en toile de fibres de carbone (TFC). *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*. 2012;25:41-58.
- [79] Qureshi J. A Review of Fibre Reinforced Polymer Structures. *Fibers*. 2022;10(3):27.
- [80] Zhang B, Zhu H, Dong Z, Yang Z. Mechanical properties and durability of FRP-reinforced coral aggregate concrete structures: A critical review. *Materials Today Communications*. 2023;35:105656.
- [81] Zhang B, Zhu H, Wu G, Wang Q, Li T. Improvement of bond performance between concrete and CFRP bars with optimized additional aluminum ribs anchorage. *Construction and Building Materials*. 2020;241:118012.
- [82] Bazli M, Heitzmann M, Hernandez BV. Hybrid fibre reinforced polymer and seawater sea sand concrete structures: A systematic review on short-term and long-term structural performance. *Construction and Building Materials*. 2021;301:124335.
- [83] Wu Z-M, Hu C-H, Wu Y-F, Zheng J-J. Application of improved hybrid bonded FRP technique to FRP debonding prevention. *Construction and Building Materials*. 2011;25(6):2898-905.
- [84] Xing L, Sun S, Mei K, Guo Y, Yang Z. Research progress on short-term mechanical properties of FRP bars and FRP-reinforced concrete beams. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2024.
- [85] Ferreira VMV, Oliveira JBd, Oliveira ÂRd, Patricio de Souza P, Patricio PSdO. Evaluation of properties of concrete coating composites based on polyurethane and reinforcing fibers. *Heliyon*. 2024;10(2):e24686.
- [86] Kim HJ, Song JH. Improvement in the mechanical properties of carbon and aramid composites by fiber surface modification using polydopamine. *Composites Part B: Engineering*. 2019;160:31-6.
- [87] Boussaha F. Comportement de fatigue des poutres en béton armé renforcées en cisaillement à l'aide de matériaux composites avancés, Thèse de Doctorat, École de technologie supérieure; 2008.
- [88] Min X, Zhang J, Tu Y, Li X, Wang C, Sas G, et al. A full-range fatigue life prediction model for RC beams strengthened with prestressed CFRP plates accounting for the impact of FRP debonding. *Engineering Structures*. 2024;301:117305.
- [89] Fallah Pour A, Gholampour A, Zheng J, Ozbakkaloglu T. Behavior of FRP-confined high-strength concrete under eccentric compression: Tests on concrete-filled FRP tube columns. *Composite Structures*. 2019;220:261-72.

- [90] Ren FM, Tian SY, Ma W, Chen GM, Tao Y, Xie P. Seismic performance of FRP-confined steel-reinforced RAC columns. *Composite Structures*. 2022;282:115077.
- [91] Zheng X, Wan B, Huang P, Huang J. Experimental study of hybrid strengthening technique using carbon fiber laminates and steel plates for reinforced concrete slabs. *Construction and Building Materials*. 2019;210:324-37.
- [92] Sena-Cruz J, Michels J, Harmanci YE, Correia L. Flexural Strengthening of RC Slabs with Prestressed CFRP Strips Using Different Anchorage Systems. *Polymers*. 2015;7(10):2100-18.
- [93] Houhou N. Durabilité des interfaces collées béton/renforts composites: développement d'une méthodologie d'étude basée sur un dispositif de fluage innovant conçu pour être couplé à un vieillissement hygrothermique, Thèse de Doctorat, Université Paris-Est; 2012.
- [94] Carolin A. Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements, Thèse de Doctorat, Luleå tekniska universitet; 2003.
- [95] BENARBIA D. Etude du comportement mécanique des poutres fissurées et renforcées par des matériaux composites, Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel Abbès-Djillali Liabes; 2018.
- [96] Carraro PA, Paipetis AS, Pontefisso A, Quaresimin M, Tzounis L, Zappalorto M. Modelling the in-plane thermoelectric properties of fibre-reinforced multi-directional laminates. *Composites Science and Technology*. 2022;218:109130.
- [97] Uomoto T, Mutsuyoshi H, Katsuki F, Misra S. Use of fiber reinforced polymer composites as reinforcing material for concrete. *Journal of materials in civil engineering*. 2002;14(3):191-209.
- [98] Foo S, Naumoski N, Saatcioglu M. Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d'atténuation des risques pour les immeubles canadiens: Book, Bureau de la protection des infrastructures essentielles et de la protection ...; 2001.
- [99] Holloway LC, Teng J-G. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites: Book, Elsevier; 2008.
- [100] Krour B. Méthode améliorée pour la réduction des contraintes de décollement dans les poutres en béton armé renforcées par des plaques en composites, Thèse de Doctorat, PhD thesis of INSA Rennes and Univ. of Sidi Bel Abbes; 2012.
- [101] McCulloch WS, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*. 1943;5:115-33.
- [102] Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ. Learning representations by back-propagating errors. *nature*. 1986;323(6088):533-6.
- [103] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*. 2012;25.
- [104] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural computation*. 1997;9(8):1735-80.
- [105] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *nature*. 2015;521(7553):436-44.

- [106] Khashin S, Shemyakova E. Growing an architecture for a neural network. ArXiv. 2021;abs/2108.02231.
- [107] Yang J. Urban Traffic Flow Prediction with Deep Neural Network. Security and Communication Networks. 2022;2022:1-10.
- [108] Ashraf A, Sayed S, Abdoulhalik A, Moutari S, Oyedele L. Applications of machine learning to water resources management: A review of present status and future opportunities. Journal of Cleaner Production. 2024:140715.
- [109] Turhan E. A comparative evaluation of the use of artificial neural networks for modeling the rainfall-runoff relationship in water resources management. Journal of Ecological Engineering. 2021;22(5).
- [110] Goodfellow I, Pouget-Abadie J, Mirza M, Xu B, Warde-Farley D, Ozair S, et al. Generative adversarial nets. Advances in neural information processing systems. 2014;27.
- [111] Cain G. Artificial Neural Networks: New Research: Book, Nova Science Publishers, Incorporated; 2016.
- [112] Jin R, Niu Q. Automatic Fabric Defect Detection Based on an Improved YOLOv5. Mathematical Problems in Engineering. 2021;2021:1-13.
- [113] Kuri-Morales AF. The best neural network architecture. Nature-Inspired Computation and Machine Learning: 13th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICAI 2014, Tuxtla Gutiérrez, Mexico, November 16-22, 2014 Proceedings, Part II 13: Springer; 2014. p. 72-84.
- [114] Mordjaoui M. MODELISATION DES EFFETS ELECTROMAGNETIQUES «Apport de la logique floue et neuro-floue»,Thèse de Doctorat, Université de Batna 2; 2008.
- [115] Gdaim S. Commande directe de couple d'un moteur asynchrone à base de techniques intelligentes,Thèse de Doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir. Tunisia; 2013.
- [116] Aradi S. Survey of deep reinforcement learning for motion planning of autonomous vehicles. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2020;23(2):740-59.
- [117] Xin Q, Wu G, Fang W, Cao J, Ping Y. Opportunities for Reinforcement Learning in Industrial Automation. 2021 7th International Conference on Big Data and Information Analytics (BigDIA): IEEE; 2021. p. 496-504.
- [118] Khan SN, Usman I. A model for english to urdu and hindi machine translation system using translation rules and artificial neural network. Int Arab J Inf Technol. 2019;16(1):125-31.
- [119] Le T-H. Neural Methods for Sentiment Analysis and Text Summarization,Thèse de Doctorat, Université de Lorraine; 2020.
- [120] Jain G, Sharma M, Agarwal B. Spam detection in social media using convolutional and long short term memory neural network. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. 2019;85(1):21-44.
- [121] Anwar SM, Majid M, Qayyum A, Awais M, Alnowami M, Khan MK. Medical image analysis using convolutional neural networks: a review. Journal of medical systems. 2018;42:1-13.

- [122] Abdou MA. Literature review: Efficient deep neural networks techniques for medical image analysis. *Neural Computing and Applications*. 2022;34(8):5791-812.
- [123] Mandlik V, Bejugam PR, Singh S. Application of artificial neural networks in modern drug discovery. *Artificial neural network for drug design, delivery and disposition*: Elsevier; 2016. p. 123-39.
- [124] Xu Y, Yao H, Lin K. An overview of neural networks for drug discovery and the inputs used. *Expert opinion on drug discovery*. 2018;13(12):1091-102.
- [125] Yoshihara A, Fujikawa K, Seki K, Uehara K. Predicting stock market trends by recurrent deep neural networks. *PRICAI 2014: Trends in Artificial Intelligence: 13th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, Gold Coast, QLD, Australia, December 1-5, 2014 Proceedings 13*: Springer; 2014. p. 759-69.
- [126] Hu Y, Su J. Research on credit risk evaluation of commercial banks based on artificial neural network model. *Procedia Computer Science*. 2022;199:1168-76.
- [127] Pal R, Chakrabarti S. A Gamification Architecture for Online Learning Platform Using Neural Network. *International Conference on Data Management, Analytics & Innovation*: Springer; 2022. p. 363-72.
- [128] Aydoğdu Ş. Predicting student final performance using artificial neural networks in online learning environments. *Education and Information Technologies*. 2020;25(3):1913-27.
- [129] Khaki S, Wang L. Crop yield prediction using deep neural networks. *Frontiers in plant science*. 2019;10:621.
- [130] Khairunniza-Bejo S, Mustaffha S, Ismail WIW. Application of artificial neural network in predicting crop yield: A review. *Journal of Food Science and Engineering*. 2014;4(1):1.
- [131] Kamyshova G, Osipov A, Gataullin S, Korchagin S, Ignar S, Gataullin T, et al. Artificial neural networks and computer vision's-based phytoindication systems for variable rate irrigation improving. *IEEE Access*. 2022;10:8577-89.
- [132] Rogachev A, Melikhova E, Belousov I. Neural Network Monitoring of Agricultural Plant Development Using Phytotronic Systems and Computer Vision. *International Conference on Soft Computing for Security Applications*: Springer; 2023. p. 609-20.
- [133] Islam M, Hatou K. Artificial intelligence assisted tomato plant monitoring system—An experimental approach based on universal multi-branch general-purpose convolutional neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024;224:109201.
- [134] Guha S, Jana RK, Sanyal MK. Artificial neural network approaches for disaster management: A literature review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2022;81:103276.
- [135] Bande S, Shete VV. Smart flood disaster prediction system using IoT & neural networks. 2017 *International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*: Ieee; 2017. p. 189-94.

- [136] Mert I, Karakuş C, Üneş F. Estimating the energy production of the wind turbine using artificial neural network. *Neural Computing and Applications*. 2016;27:1231-44.
- [137] Lu C, Li S, Lu Z. Building energy prediction using artificial neural networks: A literature survey. *Energy and Buildings*. 2022;262:111718.
- [138] Biswas MR, Robinson MD, Fumo N. Prediction of residential building energy consumption: A neural network approach. *Energy*. 2016;117:84-92.
- [139] Qayyum Khan A, Ahmad Awan H, Rasul M, Ahmad Siddiqi Z, Pimanmas A. Optimized artificial neural network model for accurate prediction of compressive strength of normal and high strength concrete. *Cleaner Materials*. 2023;10:100211.
- [140] Yeh IC. Modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks. *Cement and concrete research*. 1998;28(12):1797-808.
- [141] Siddique R, Aggarwal P, Aggarwal Y. Prediction of compressive strength of self-compacting concrete containing bottom ash using artificial neural networks. *Advances in Engineering Software*. 2011;42(10):780-6.
- [142] Shahin M, Maier H, Jaksa M. Predicting Settlement of Shallow Foundations using Neural Networks. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG*. 2002;128.
- [143] Kellouche Y, Boukhatem B, Ghrici M, Tagnit-Hamou A. Exploring the major factors affecting fly-ash concrete carbonation using artificial neural network. *Neural Computing and Applications*. 2019;31:969-88.
- [144] Bardhan A, Asteris PG. Application of hybrid ANN paradigms built with nature inspired meta-heuristics for modelling soil compaction parameters. *Transportation Geotechnics*. 2023;41:100995.
- [145] Ghahremani B, Bitaraf M, Ghorbani-Tanha A, Fallahi R. Structural damage identification based on fast S-transform and convolutional neural networks. *Structures*. 2020;29:1199-209.
- [146] Jia J, Li Y. Deep learning for structural health monitoring: Data, algorithms, applications, challenges, and trends. *Sensors*. 2023;23(21):8824.
- [147] Dawson CW, Abrahart RJ, See LM. HydroTest: a web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environmental Modelling & Software*. 2007;22(7):1034-52.
- [148] Goh A. Probabilistic neural network for evaluating seismic liquefaction potential. *Canadian Geotechnical Journal*. 2011;39:219-32.
- [149] Moayedi H, Xu M, Naderian P, Ahmadi Dehrashid A, Thi QT. Validation of four optimization evolutionary algorithms combined with artificial neural network (ANN) for landslide susceptibility mapping: A case study of Gilan, Iran. *Ecological Engineering*. 2024;201:107214.

- [150] Goh AT. Seismic liquefaction potential assessed by neural networks. *Journal of Geotechnical engineering*. 1994;120(9):1467-80.
- [151] Adeli H, Jiang X. Neuro-fuzzy logic model for freeway work zone capacity estimation. *Journal of Transportation Engineering*. 2003;129(5):484-93.
- [152] Floriano BRO, Vargas AN, Ishihara JY, Ferreira HC. Neural-network-based model predictive control for consensus of nonlinear systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022;116:105327.
- [153] Ataei P, Takhravan A, Gheibi M, Chahkandi B, Faramarz MG, Waławek S, et al. An intelligent decision support system for groundwater supply management and electromechanical infrastructure controls. *Heliyon*. 2024;10(3):e25036.
- [154] Yan H, Zhang Ta, Qi Y, Yu D-J. Short-term traffic flow prediction based on a hybrid optimization algorithm. *Applied Mathematical Modelling*. 2022;102:385-404.
- [155] Flood I, Kartam N. Neural networks in civil engineering. I: Principles and understanding. *Journal of computing in civil engineering*. 1994;8(2):131-48.
- [156] Gomes WJdS. Structural Reliability Analysis Using Adaptive Artificial Neural Networks. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*. 2019;5(4):041004.
- [157] Waszczyszyn Z. Neural networks in the analysis and design of structures: Book, Springer; 1999.
- [158] Nourian N, El-Badry M, Jamshidi M. Design Optimization of Truss Structures Using a Graph Neural Network-Based Surrogate Model. *Algorithms*. 2023;16(8):380.
- [159] Zhang X. Design optimization of irregularity RC structure based on ANN-PSO. *Heliyon*. 2024;10(5):e27179.
- [160] Cha YJ, Choi W, Büyüköztürk O. Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2017;32(5):361-78.
- [161] Sung D-G, Lim S-H, Ko J-W, Cho G-S. Scenic evaluation of landscape for urban design purposes using GIS and ANN. *Landscape and Urban Planning*. 2001;56(1):75-85.
- [162] Yeo I-A, Yee J-J. A proposal for a site location planning model of environmentally friendly urban energy supply plants using an environment and energy geographical information system (E-GIS) database (DB) and an artificial neural network (ANN). *Applied Energy*. 2014;119:99-117.
- [163] Zhou Y, Zheng Y, Liu Y, Pan T, Zhou Y. A hybrid methodology for structural damage detection uniting FEM and 1D-CNNs: Demonstration on typical high-pile wharf. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022;168:108738.
- [164] Drieschner M, Wolf C, Seiffarth F, Petryna Y. Combined ANN-FEM approach for spatial-temporal structural response prediction: Method and experimental validation. *Thin-Walled Structures*. 2023;189:110800.

- [165] Sharma A, Shukla NK, Belarbi M-O, Abbas M, Garg A, Li L, et al. Bio-inspired nacre and helicoidal composites: From structure to mechanical applications. *Thin-Walled Structures*. 2023;192:111146.
- [166] Paruthi S, Sharma N, Gulia R, Choudhary L, Sharma A, Belarbi MO, et al. Thermal-Based Free Vibration and Buckling Behavior of Bio-inspired Cross- and Double-Helicoidal/Bouligand Laminated Composite Plates. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2023;36(6):933-42.
- [167] Do N-T, Nguyen TT, Tran TT, Le PB, Pham Q-H. Free vibration analysis of bio-inspired helicoid laminated composite plates resting on elastic foundation using isogeometric analysis and artificial neural network. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2023.
- [168] Garulli T, Katafiasz TJ, Greenhalgh ES, Pinho ST. A novel bio-inspired microstructure for improved compressive performance of multidirectional CFRP laminates. *Composites Part B: Engineering*. 2023;264:110867.
- [169] Ding Z, Xiao H, Duan Y, Wang B. Bio-inspired self-stitching for enhancing ductility and impact resistance of unidirectional laminated composites. *Composites Science and Technology*. 2023;242:110184.
- [170] Garg A, Belarbi MO, Chalak HD, Li L, Sharma A, Avcar M, et al. Buckling and free vibration analysis of bio-inspired laminated sandwich plates with helicoidal/Bouligand face sheets containing softcore. *Ocean Engineering*. 2023;270:113684.
- [171] Zhang X, Luan Y, Li Y, Wang Z, Li Z, Xu F, et al. Bioinspired design of lightweight laminated structural materials and the intralayer/interlayer strengthening and toughening mechanisms induced by the helical structure. *Composite Structures*. 2021;276:114575.
- [172] Majzoobi GH, Kashfi M, Bonora N, Iannitti G, Ruggiero A, Khademi E. A new constitutive bulk material model to predict the uniaxial tensile nonlinear behavior of fiber metal laminates. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2018;53(1):26-35.
- [173] Karamanli A, Vo TP, Eltaher MA. Comprehensive analysis of bio-inspired laminated composites plates using a quasi-3D theory and higher order FE models. *Thin-Walled Structures*. 2024;198:111735.
- [174] Bouchikhi AS, Lousdad A, Megueni A. On the reduce of interfacial shear stresses in fiber reinforced polymer plate retrofitted concrete beams. *Materials & Design*. 2010;31(3):1508-15.
- [175] Benyoucef S, Tounsi A, Benrahou KH, Adda Bedia EA. Time-dependent behavior of RC beams strengthened with externally bonded FRP plates: interfacial stresses analysis. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2008;11(3-4):231-48.
- [176] Daouadji TH, Rabahi A, Abbes B, Adim B. Theoretical and finite element studies of interfacial stresses in reinforced concrete beams strengthened by externally FRP laminates plate. *Journal of adhesion science and Technology*. 2016;30(12):1253-80.
- [177] Antar K, Amara K, Benyoucef S, Bouazza M, Ellali M. Hygrothermal effects on the behavior of reinforced-concrete beams strengthened by bonded composite laminate plates. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*. 2019;69(3):327-34.

- [178] Herakovich CT. Mechanics of fibrous composites. (No Title). 1998.
- [179] Jiang H, Ren Y, Liu Z, Zhang S, Lin Z. Low-velocity impact resistance behaviors of bio-inspired helicoidal composite laminates with non-linear rotation angle based layups. *Composite Structures*. 2019;214:463-75.
- [180] Mazars J, Pijaudier-Cabot G. From damage to fracture mechanics and conversely: A combined approach. *International Journal of Solids and Structures*. 1996;33(20):3327-42.
- [181] Tounsi A, Hassaine Daouadji T, Benyoucef S, Adda bedia EA. Interfacial stresses in FRP-plated RC beams: Effect of adherend shear deformations. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2009;29(4):343-51.
- [182] Rabahi A, Benferhat R, Daouadji TH, Boussad A, Adim B, Fazilay A. Elastic analysis of interfacial stresses in prestressed PFGM-RC hybrid beams. *Advances in materials Research*. 2018;7(2):83.
- [183] Fanoodi B, Malmir B, Jahantigh FF. Reducing demand uncertainty in the platelet supply chain through artificial neural networks and ARIMA models. *Computers in biology and medicine*. 2019;113:103415.
- [184] Soori M, Arezoo B, Dastres R. Artificial neural networks in supply chain management, a review. *Journal of Economy and Technology*. 2023.
- [185] Krour B, Bernard F, Tounsi A. Fibers orientation optimization for concrete beam strengthened with a CFRP bonded plate: A coupled analytical–numerical investigation. *Engineering Structures*. 2013;56:218-27.
- [186] Chedad A, Daouadji TH, Abderezak R, Belkacem A, Abbes B, Rabia B, et al. A high-order closed-form solution for interfacial stresses in externally sandwich FGM plated RC beams. *Advances in materials Research*. 2017;6(4):317.
- [187] Simon H. *Neural networks and learning machines*. Pearson Education, Inc; 2009.
- [188] Chergui S, Daouadji TH, Hamrat M, Boulekbache B, Bougara A, Abbes B, et al. Interfacial stresses in damaged RC beams strengthened by externally bonded prestressed GFRP laminate plate: Analytical and numerical study. *Advances in materials Research*. 2019;8(3):197.
- [189] Guenaneche B, Krour B, Tounsi A, Fekrar A, Benyoucef S. Elastic analysis of interfacial stresses for the design of a strengthened FRP plate bonded to an RC beam. *International journal of adhesion and adhesives*. 2010;30(7):636-42.
- [190] Krour B, Tounsi A, Benyoucef S, Adda Bedia E. An improved closed-form solution to interfacial stresses in RC beams strengthened with a composite plate. *Mechanics of Composite Materials*. 2010;46:331-40.